



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки 03.03.02 «Физика»
Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики
БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Структурно-фазовые превращения в титановом сплаве ВТ6 при газофазном наводороживании

УДК 669.295.5.094:536.42.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б51	Му Цаюань		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Лидер А. М.	д.т.н., доцент		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сыртанов М.С.	к.т.н		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Л.А.			

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Конотопский В. Ю.	к.э.н. доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Лидер А. М.	д.т.н., доцент		

Томск – 2019 г.

Запланированные результаты обучения по программе

Код результата	Результатобучения (выпускник способен)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные компетенции</i>		
P1	Использовать основные этапы и закономерности исторического развития общества, основы философских, экономических, правовых знаний для формирования мировоззренческой, гражданской позиций и использования в различных сферах жизнедеятельности	Требования ФГОС3+ (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОК-4)
P2	К самоорганизации и самообразованию, работать в коллективе, к коммуникации в устной и письменной формах, в том числе на иностранном языке, толерантно воспринимать социальные, этические и культурные различия, использовать методы и средства физической культуры, приёмы первой помощи и методы защиты в условиях ЧС.	Требования ФГОС3+ (ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9)
<i>Общепрофессиональные компетенции</i>		
P3	Использовать в профессиональной деятельности базовые естественнонаучные знания, современные концепции и ограничения естественных наук, использовать фундаментальные знания разделов общей и теоретической физики, математики для создания моделей и решения типовых профессиональных задач, в том числе с использованием знаний профессионального иностранного языка.	Требования ФГОС3+ (ОПК-1, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-7)
P4	Понимать сущность и значение информации, соблюдать основные требования информационной безопасности, использовать методы, способы, средства получения и хранения информации, решать стандартные задачи на основе информационной и библиографической культуры.	Требования ФГОС3+ (ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6)
P5	Получить организационно-управленческие навыки при работе в научных группах, критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, нести ответственность за последствия своей инженерной деятельности.	Требования ФГОС3+ (ОПК-8, ОПК-9)
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P6	<u>Научно-исследовательская деятельность</u> Проводить научные теоретические и экспериментальные исследования в областях: материаловедения, атомной и ядерной физики, водородной энергетики, физики плазмы с помощью современной приборной базы с использованием специализированных знаний физики и освоенных профильных дисциплин.	Требования ФГОС3+ (ПК-1, ПК-2)
P7	<u>Научно-инновационная деятельность</u> Применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований, а также профессиональные знания и умения в результате освоения профильных дисциплин для проведения физических исследований в инновационных областях науки, используя современные методы обработки, анализа и синтеза информации.	Требования ФГОС3+ (ПК-3, ПК-4, ПК-5)
P8	<u>Организационно-управленческая</u> Использовать на практике теоретические основы организации и планирования физических исследований, участвовать в подготовке и составлении научной документации по установленной форме, понимать и применять на практике	Требования ФГОС3+ (ПК-6, ПК-7, ПК-8)

	методы управления в сфере природопользования	
Р9	<u>Педагогически-просветительская</u> Проектировать, организовывать, анализировать педагогическую деятельность, владеть последовательностью изложения материала с использованием междисциплинарных связей физики с другими дисциплинами, участвовать в информационно-образовательных мероприятиях по пропаганде и распространению научных знаний	Требования ФГОСЗ+ (ПК-9)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки 03.03.02 «Физика»
Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ Лидер

А.М.
(Подпись) (Дата)
(Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
150Б51	Му Цаююань

Тема работы:

Структурно-фазовые превращения в титановом сплаве ВТ6 при газофазном
наводороживании

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</p>	<p>Объект исследования: структурно-фазовое состояние титанового сплава ВТ6 в процессе газофазного наводороживания</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Обзор литературных источников; – Подготовка образцов; – Исследование изменения параметров решетки титанового сплава ВТ6 при нагрева от комнатной температуры до 500 °С – Исследование структуры и фазовых переходов титанового сплава ВТ6 при наводороживании – Анализ кривых адсорбции водорода

	<p>титанового сплава ВТ6 при различных обработках</p> <ul style="list-style-type: none"> – Исследование тонкой структуры титанового сплава ВТ6 методом ПЭМ – Анализ полученных результатов; – Заключение.
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Ларионова Е. В.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Черепанова Н.В.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сыртанов М.С	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б51	Му Цаоюань		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
150Б51	Му Цаоюань

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	Экспериментальной физики
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	03.03.02 Физика

Тема ВКР:

Структурно-фазовые превращения в титановом сплаве ВТ6 при газофазном наводороживании	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Вещество: титанового сплава ВТ6; Прибор: Shimadzu XRD-7000S и автоматизированный комплекс GRC; Применение: аэрокосмическая промышленность; медицине и т.д.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: — специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; — организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	1. ГОСТ 12.1.006–84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности. 2. ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные помещения. Параметры микроклимата в помещении; 3. ГОСТ 12.1.005 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны; 4. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. 5. ГОСТ 12.1.003–2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	1. Загрязнение окружающей среды, вызванное утечкой электромагнитного излучения; 2. Загрязнение окружающей среды от экспериментальных отходов 3. Взрыв, вызванный высокими температурами 4. Радиационная безопасность; 5. пожаровзрывобезопасность
3. Экологическая безопасность:	1. Утилизация металлических отходов. 2. Защита от электромагнитного излучения.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	1. Повышение устойчивости системы электроснабжения; 2. Обеспечение устойчивости теплоснабжения за счет запасных автономных источников теплоснабжения, кольцевания системы, заглубления теплотрасс.; 3. Обеспечение устойчивости систем водоснабжения; 4. Обеспечение устойчивости системы водоотведения.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Л.А.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б51	Му Цаоюань		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ,
РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
150Б51	Му Цаюань

Школа	ИЯТШ	Отделение	Экспериментальной физики
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	Физика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических; энергетических; финансовых; информационных; человеческих; 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов; 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования.	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения 2. Планирование научно-исследовательских работ 3. Составление бюджета внедрения инженерного	
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. Оценка конкурентоспособности технических решений 2. Альтернативы проведения НИ 3. График проведения и бюджет НИ 4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Конотопский В. Ю.	к.э.н. доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
150Б51	Му Цаюань		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Уровень образования бакалавриат
Направление подготовки 03.03.02 «Физика»
Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики
Период выполнения _____

Форма представления работы:

бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
01.03.2018	Аналитический обзор литературы	10
01.09.2018	Исследование изменения параметров решетки титанового сплава ВТ6 при нагрева от комнатной температуры до 500 °С.	10
30.12.2018	Исследование структуры и фазовых переходов титанового сплава ВТ6 при наводороживании.	10
15.01.2019	Анализ кривых адсорбции водорода титанового сплава ВТ6 при различных обработках.	10
20.02.2019	Исследование тонкой структуры титанового сплава ВТ6 методом ПЭМ.	10
30.04.2019	Анализ результатов.	15
25.05.2019	Социальная ответственность.	15
25.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.	15
25.05.2019	Заключение.	5

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сыртанов М.С	К.Т.Н		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Сыртанов М.С	К.Т.Н		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 79 с., 21 рисунок, 12 таблицы, 39 источников литературы.

Ключевые слова: водород, кривые адсорбции водорода, титанового сплава ВТ6, водородное охрупчивание, параметры решетки, *in situ* дифрактометрия, просвечивающая электронная микроскопия.

Объектом исследования являлся титановый сплав ВТ6 в исходном состоянии и после обработки электронным пучком.

Цель работы – Изучить влияние наводороживания на изменение структурно-фазового состава титанового сплава ВТ6.

В первой главе описаны общие сведения взаимодействия водорода с металлами, такие как проникновение и состояние водорода в металлах. Описано взаимодействие водорода с титаном, а также влияние водорода на физико-механические свойства.

Во второй главе проставлены приборы и методы исследований приведённый в работе. Указаны основные параметры отжига титанового сплава ВТ6, рассмотрены принцип работы автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller, рентгеновского дифрактометра и просвечивающего электронного микроскопа. Представлен разработанный в ТПУ дифракционный комплекс для исследования структурных и фазовых изменений в материалах при повышенных температурах и газовой среде.

В третьей главе показаны изменения структуры и фазовые превращения в титановом сплаве ВТ6 при линейном нагреве и наводороживании в различных условиях. Результаты, полученные с помощью дифракции рентгеновских лучей, были подтверждены методами просвечивающей электронной микроскопии и анализом кривых адсорбции водорода.

В четвертой главе описана социальная часть проведенного исследования.

В пятой главе описан финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение данной работы.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	14
ГЛАВА 1. Обзор литературы	16
1.1 Титановые сплавы	16
1.1.1 Классификация титановых сплавов	16
1.1.1.1 α - титановый сплав.....	16
1.1.1.2 β - титановый сплав.....	16
1.1.1.3 $\alpha + \beta$ титановый сплав.....	17
1.1.2 Свойства титановых сплавов	18
1.1.3 Применение титановых сплавов.....	20
1.1.3.1 В авиастроении	20
1.1.3.2 В морских условиях	21
1.1.3.3 В химической промышленности.....	21
1.1.3.4 В медицине.....	21
1.2 Взаимодействие с водородом.....	22
1.2.1 Изменение фазового состояния сплава Ti-6Al-4V под действием водорода.	22
1.2.2 Определение фазовой границы	24
1.3 Водородное охрупчивание	26
1.3.1 Изменение механических свойств при испытаниях на ударный изгиб по Шарпи	26
1.3.2 Изменение механических свойств при одноосном растяжении.....	27
1.3.3 Изменение механических свойств при разрушении.....	30
ГЛАВА 2. Приборы и методы исследования.....	31
2.1 Подготовка образцов.....	31
2.1.1 Тонкая шлифовка.	31
2.1.2. Полировка.	32
2.1.3 Отжиг.....	33
2.2 Насыщение водорода	34
2.3 Рентгеновская дифракция.....	35

2.4 Просвечивающая электронная микроскопия	38
2.5 Дифракционный комплекс	40
ГЛАВА 3. Результаты и их обсуждения.....	42
ГЛАВА 4. Социальная ответственность	48
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	48
4.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.	48
4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.....	49
4.2 Профессиональная социальная безопасность.	50
4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования и возникнуть в лаборатории.	50
4.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	51
4.3 Экологическая безопасность.....	55
4.3.1 Анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду.....	55
4.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.....	56
4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	56
4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может возникнуть в лаборатории и инициировать объект исследований.....	56
4.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.....	57
ГЛАВА 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	60
5.1 Организация и планирование работ	60
5.1.1 Продолжительность этапов работ	61
5.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта	68
5.2.1 Расчет затрат на материалы.....	68
5.2.2 Расчет заработной платы	69

5.2.3 Расчет затрат на социальный налог	70
5.2.4 Расчет затрат на электроэнергию	70
5.2.5 Расчет амортизационных расходов	71
5.2.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных).....	73
5.2.7 Расчет прочих расходов.....	73
5.2.8 Расчет общей себестоимости разработки	73
Заключение	75
Список использованных источников.....	76

Введение

Титановые сплавы обладают высоким коэффициентом прочности/веса и хорошей коррозионной стойкостью, хорошей пластичностью, вязкостью, сопротивлением ползучести и свариваемостью [1]. Обладает хорошей общей производительностью, является новым типом материалов с большим потенциалом для развития и перспектив применения [2].

С 1950-х годов титановая промышленность быстро развивалась из-за острой потребности в аэрокосмических технологиях. В настоящее время титан и титановые сплавы являются не только незаменимыми конструкционными материалами в аэрокосмической промышленности, но и широко используются в судостроении, химической, металлургической, медицинской и других областях.

Во многих из этих технологических применений титановый сплав ВТ6 подвергается воздействию сред, которые могут являться источниками водорода, и могут возникнуть серьезные проблемы на основе широко известной восприимчивости титановых сплавов к водородному охрупчиванию. Результаты осаждения и разложения хрупкой гидридной фазы часто объясняются основным механизмом водородного охрупчивания титановых сплавов. В результате взаимодействия титановых сплавов с водородом возможно образование сильной химической связи (гидрида титана). Гидрид титана имеет высокую твердость, но является очень хрупким. Проникновение и накопление водорода в титановые сплавы может существенно ухудшить механические свойства материала, а также привести к их разрушению. Даже небольших концентрации водорода достаточно для образования гидридов титана в локальных областях, которые могут привести к разрушению материала [3]. Для защиты титановых сплавов от водородного охрупчивания необходимо оценить влияние концентрации водорода на структурные и фазовые изменения в процессе наводороживания.

Цель работы: Изучить влияние наводороживания на изменение структурно-фазового состава титанового сплава ВТ6.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Экспериментально определить коэффициент термического расширения титанового сплава ВТ6 в процессе линейного нагрева.
2. Провести анализ изменения фазового состава титанового сплава ВТ6 в исходном состоянии и после обработки электронным пучком в процессе наводороживания.
3. Оценить скорость сорбции титанового сплава ВТ6 в исходном состоянии и после обработки электронным пучком.

ГЛАВА 1. Обзор литературы

1.1 Титановые сплавы

1.1.1 Классификация титановых сплавов

Титановые сплавы могут быть классифицированы на три типа в зависимости от их отожженной структуры: α сплавы, β сплавы и $\alpha + \beta$ сплавы. Если сплав остынет от температуры выше температуры β фазового перехода, он превратится в полосу структуры α фазы, этот сплав называется α сплавом; если получена одна нестабильная β фаза, такой сплав является β сплавом. Другие - это сплавы $\alpha + \beta$.

1.1.1.1 α - титановый сплав

α титановый сплав представляет собой однофазный сплав, состоящий из твердого раствора α фазы с ГПУ решеткой. У них стабильная организация, износостойкость выше, чем чистый титан, антиокислительная способность. При 500-600 °C сохраняют свою прочность и сопротивление ползучести.[1].

α сплавы характеризуются однофазной структурой. Они не упрочняются термической обработкой. Повышение их прочности достигается холодной пластической деформацией [4].

Кислород и азот имеют большую растворимость в α фазе, оказывая значительное упрочняющее действие на титановый сплав, но со значительным снижением пластичности. Растворимость водорода в α фазе очень мала (примерно 0,1 масс.%). Превышение предела растворимости приведет к образованию гидроксида и впоследствии возможно водородное охрупчивание. Содержание водорода в титановом сплаве обычно контролируется ниже 0,015% [2]

Алюминий улучшает стабильность α фазы [4].

1.1.1.2 β - титановый сплав

β -титановый сплав представляет собой β фазовый твердый раствор, состоящий из однофазного сплава с ОЦК кристаллической решеткой [1].

β сплава имеет высокопрочную и хорошую свариваемость, но плохую термическую стабильность [4].

β сплавы в основном используется для изготовления лопастей компрессоров пружин и крепежных деталей, которые работают при температурах ниже 350 °С [4].

Элементы, которые могут увеличить стабильность β фазы, вызываются β стабилизаторами. В этой группе элемент подразделяется на две подгруппы. Эвтектоидное разложение β фазы происходит при достаточно низкой температуре в сплаве титана и первой группе элементов. Например Cr, Fe, Mn. Эти элементы называются β -эвтектоидными стабилизаторами. Во второй группе титановых сплавов β твердый раствор поддерживается при комнатной температуре при достаточно высокой концентрации, и эвтектоидное разложение не происходит. Такой элемент называется изоморфным β стабилизатором. Например V, Mo [4].

1.1.1.3 $\alpha + \beta$ титановый сплав

Большинство промышленных титановых сплавов имеют полную полиморфную трансформацию $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ при температуре в диапазоне 750-1020 °С в зависимости от содержания и типа легирующих элементов и примесей (α или β стабилизаторов) [2].

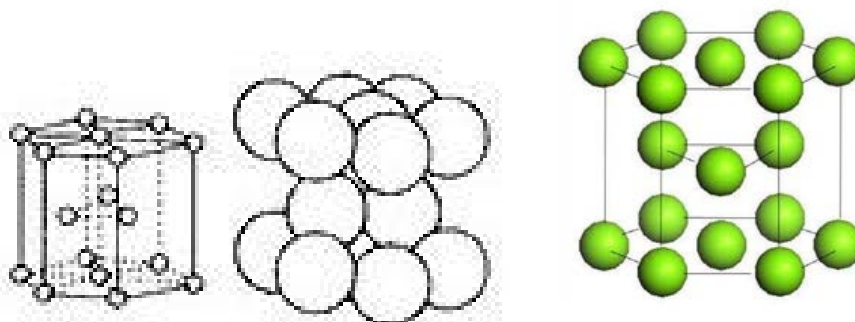


Рисунок 1 – Элементарная ячейка ГПУ структуры

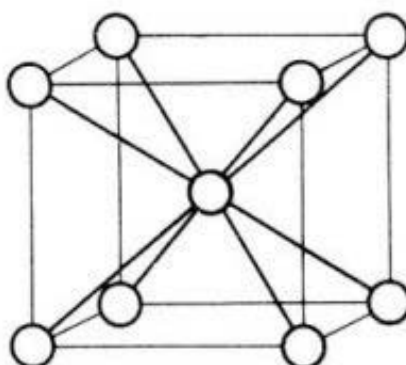


Рисунок 2 – Элементарная ячейка ОЦК структуры

Первая категория включает низколегированный сплав $\alpha+\beta$ -мартенсит (псевдо α сплав). Среди них помимо алюминия также присутствует небольшое количество элемента, который стабилизирует β фазу в пределах, близких к растворимости в α титане. Этот тип сплава включает сплавы ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4, ВТ4 и сплавы ВТ20 (6% Al-2% Zr-Mo-1% V) с 1-5% Al и 0,8-2,0% Mn. Прочность на растяжение составляет от 500 до 950 МПа из-за этого легирования [1].

Вторая категория включает сплавы $\alpha+\beta$ -мартенситные сплавы среднего сорта: ВТ6С, ВТ6, ВТ14, ВТ23, ВТ23М (структура) и ВТ3-1, ВТ8, ВТ9 (теплота). Эти сплавы гасятся от температуры в β области до α' фазы. Самый прочный паяемый сплав ВТ23 используется для комплексного легирования четырех β стабилизаторов с использованием более дешевых легирующих элементов из хрома и железа [1]. Третья категория включает высоколегированный сплав $\alpha+\beta$ -мартенсит [4].

1.1.2 Свойства титановых сплавов

Человеческое развитие и использование различных типов титановых сплавов можно проследить до 1951 года. В таблице 1 приведены названия нескольких распространенных сплавов и их механические характеристики. [1].

Таблица 1. Наименование сплава и его химический состав.

Марка сплава и их средний химический состав				
Наименование сплава	химический состав, %	σ_B МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ_5 , %
Низкая интенсивность (Материалы для испытаний представляют собой пластины толщиной 0,5-10 мм диаметром до 60 мм).				
ВТ1-00	Нелегированный титан	400	270	25
ВТ1-0	Нелегированный титан	500	380	20

OT4-0	Ti–0,8Al–0,8Mn	550	480	20
ПТ-7М	Ti–2,2Al–2,5Zr	500	380	20
OT4-1	Ti–1,5Al–1,0Mn	600	500	20
OT4-1B	Ti–1,5Al–1,2V	600	500	20
Средней интенсивности (Материалы для испытаний представляют собой пластины толщиной 0,5-10 мм диаметром до 60 мм).				
OT4	Ti–4,2Al–1,6Mn	700	650	11
OT4-B	Ti– 4,2Al–1,8V	700	650	12
ПТ-3В	Ti–4,2Al–1,6V	700	650	11
BT5-1	Ti–5,2Al–2,5Sn	800	750	10
BT6	Ti–6,0Al–4,4V	920	850	10
BT20	Ti–6,5Al–1,2Mo–1,3V	950	900	10
Высокая интенсивности (Характеристики материала для испытаний диаметром до 60 мм).				
BT-14	Ti–4,5Al–3Mo–1V	1120	1200	6
BT16	Ti–2,8Al–5Mo–5V	1100	1000	12
BT23	Ti–5,5Al–2Mo–4,5V–1Cr–0,7Fe	1190	1050	6
BT22	Ti–5,0Al–5Mo–5V–1Cr–1Fe	1200	1100	6
BT22И	Ti–2,5Al–5Mo–5V–1Fe–1Cr	1150	1050	8
BT22М	Ti–5,5Al–5Mo–5V–1Fe–1Cr– 2,5Zr–1,5Sn	1200	1100	6
BT35	Ti–3,0Al–1,5Mo–15V–3Sn–3Cr	1200	1100	6
BT32	Ti–2,5Al–8Mo–8V–1,2Cr–1,2Fe	1200	1100	6
BT15	Ti–3,0Al–7Mo–11Cr	1200	1150	4

(σ_b Предел прочности при растяжении, $\sigma_{0,2}$ Предел текучести, δ Удлинение после разрыва)

Алюминий обеспечивает высокую длительную прочность титановых сплавов [6].

Молибден и ванадий улучшают комплекс механических свойств

титановых сплавов, особенно жаропрочных, повышая их термическую стабильность. Титановые сплавы, содержащие хром, марганец и железо, подвержены эвтектоидному охрупчиванию, состоящему в выделении интерметаллидов при повышенной температуре эксплуатации, особенно под действием напряжений. Молибден и ванадий, будучи введенными в такие сплавы, подавляют развитие подобных процессов и обеспечивают стабильность свойств во времени [6].

1.1.3 Применение титановых сплавов

В настоящее время крупнейшим потребителем титанового сплава является аэрокосмическая промышленность. В последние годы значительно увеличилось применение титанового сплава в химической, транспортной, пищевой, судостроительной, нефтегазовой, медицине, строительстве и других областях [1].

1.1.3.1 В авиастроении

Применение титановых сплавов в аэрокосмической и военной технике, в основном использовать его отличные комплексные механические свойства, низкая плотность и хорошая коррозионная стойкость. Например, аэрокосмические конструкции требуют высокой прочности на растяжение в сочетании с хорошей усталостной прочностью и вязкостью разрушения. Превосходная высокотемпературная прочность на растяжение, предел ползучести и высокотемпературная стабильность титановых сплавов также сделали их пригодными для использования в реактивных двигателях. [1].

Согласно статистике, применение титана в аэрокосмической промышленности составляет около 70% от общего объема производства титана, включая военные самолеты, гражданские самолеты, космические аппараты, спутники с оболочками, высокопрочные болты, топливные баки, корпус и так далее [6].

Все компоненты и конструкции мейнфреймов (диски, лезвия, корпуса и т.д.), которые работают при температурах в диапазоне от 150 до 600 °С, могут быть изготовлены из термостойких титановых сплавов [1].

1.1.3.2 В морских условиях

Титановые сплавы широко используются в судостроении и в основном используются в качестве коррозионностойких материалов в морской воде с удовлетворительными прочностными свойствами. Титановые сплавы используются при изготовлении вкладышей контейнеров, воздушных винтов, теплообменников и другого морского оборудования. Обычно используются титановые сплавы низкой прочности и средней прочности, которые хорошо привариваются ко всем типам сварных швов и имеют хорошую техническую пластичность. [7].

1.1.3.3 В химической промышленности

Химическая промышленность, металлургия, производство бумаги, каустическая сода, нефтяная и пестицидная промышленность являются более ранними отраслями промышленности, использующими титановые сплавы. Титановые сплавы широко используются при производстве каустических жидкостей (рН 3,5, кислотность), уксусной кислоты, емкостных устройств соляной кислоты. Они используются как адсорберы, теплообменные устройства, фильтры, запорные устройства и другие устройства, работающие в агрессивных средах. Титан подходит для работы при низких температурах [8].

1.1.3.4 В медицине

Титан и титановые сплавы обладают хорошей биосовместимостью и коррозионной стойкостью. В металлических материалах, используемых для восстановления твердых тканей в теле человека. Модуль упругости титана наиболее близок к тканям человека. Это может уменьшить механическую несовместимость между металлическими имплантатами и костной тканью [7].

Титановые сплавы имеют более высокую прочность и твердость, чем чистый титан, и ниже, чем сплавы кобальт-хром и никель-хромовые сплавы. Титановый сплав подходит для изготовления зубных протезов Кронштейн кольца из-за его хорошей эластичности. [9].

1.2 Взаимодействие с водородом

1.2.1 Изменение фазового состояния сплава Ti-6Al-4V под действием водорода.

Водород в качестве легирующего элемента изменяет фазовые составы и кинетику фазовых превращений в титановых сплавах, что позволяет использовать новые термические и термомеханические методы. Таким образом, после термоводородной обработки могут быть получены новые микроструктуры и улучшенные механические свойства двухфазных титановых сплавов [10].

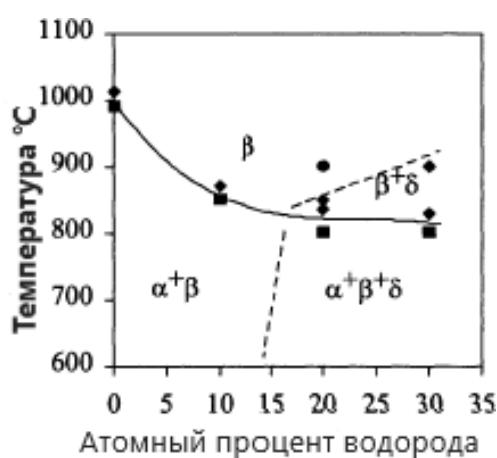


Рисунок 3 – Фазовые границы в системе Ti-6Al-4V-водород согласно Kerr и др. [10]

Также легирование водородом на некоторый срок улучшает вязкость титановых сплавов [10].

На основе анализа системы Ti-6Al-4V-водород методами оптической микроскопии (ОМ) и рентгеновской дифракции (РД) Kerr и другие предложили образование гидридной фазы путем эвтектидного превращения β фазы около 800 °С, что является значительным отклонением от чистой системы титан-водород, в которой эвтектидное превращение происходит на 500 °С [10].

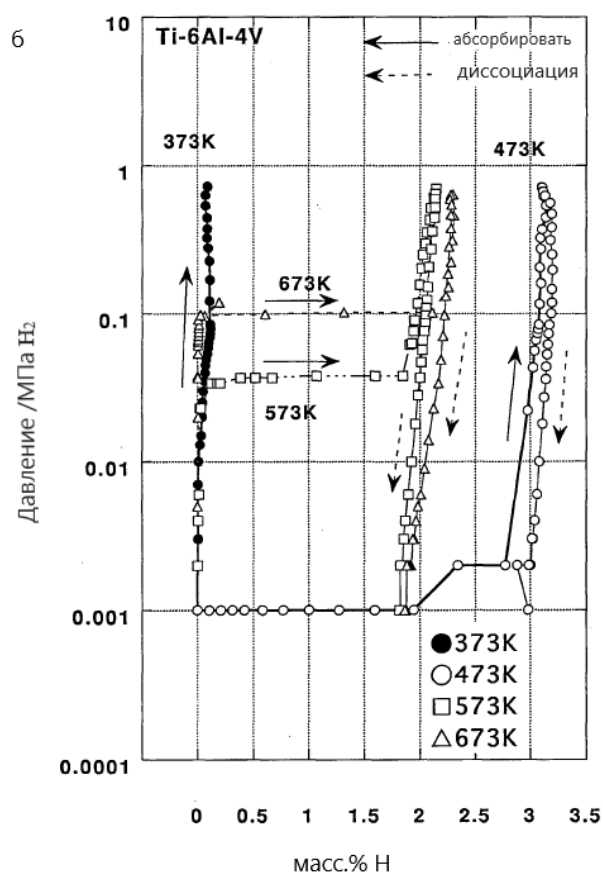
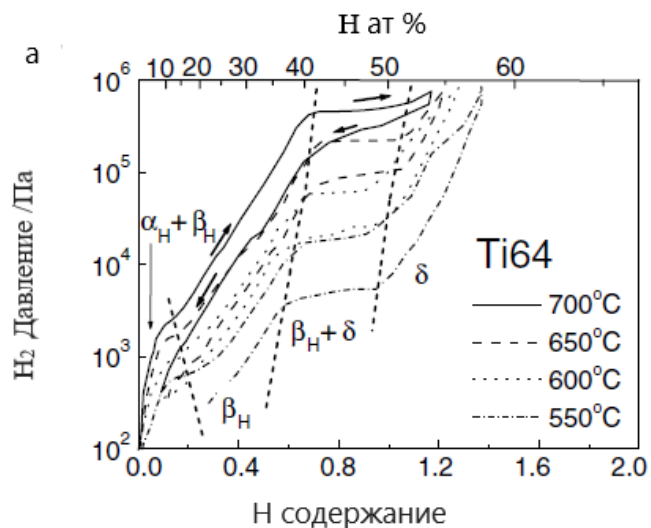


Рисунок 4 – Фазовые границы в системе Ti-6Al-4V-водород [10].

Ishiyama и другие впервые показали кривые давление-концентрация для системы Ti-6Al-4V-H при 100-400°C до 60 ат. %H [11]. Они обнаружили, что сплав Ti-6Al-4V при 473K, ниже 0,01 МПа и при 573-673 K, 0,03-0,1 МПа может использоваться в качестве типичного поглощающего водород материала, но поглощение водорода не наблюдается ниже 373 K.

Максимальная концентрация водорода в образце составляла около 3 масс.% Н при 473 К и уменьшалось с повышением температуры более 473К (рисунок 4 б) [11].

Плато высокого давления при 466 кПа соответствует сосуществованию $\beta_{H,0.70}$ и $\delta_{1.08}$, и в конечном итоге содержание водорода в δ фазе достигает 1,37 Н/М при 10^6 Па (рисунок 4 а) [12].

В диапазоне концентраций водорода от 0 до по меньшей мере 10 ат.% гидридная фаза присутствует в интервале температур от 20 °С до 1000 °С, а водород образует междоузельные твердые растворы в α и β фазах. Температура β перехода быстро увеличивается с ростом концентрации водорода. Объемная доля β фазы в диапазоне $\alpha+\beta$ фазы увеличивается, и водород концентрируется в β фазе в диапазоне концентраций от 0 до 10 ат.% [10]. Такой результат подтверждает, что водород является эффективным β стабилизатором. Он снижает температуру β перехода, а также замедляет скорость разложения метастабильной (остаточной) β фазы при изотермическом отжиге при температурах ниже β перехода [13].

Shen указывает, при содержании водорода 1,17 Н/М при 600°С сплав превращается в одну δ фазу и, следовательно, можно назвать $H_{1.17}$. После удаления водорода из Ti-6Al-4V он снова превращается в смесь α и β фазы [12].

На основе фазового анализа и кривых сорбции-десорбции водорода последовательность фазовых превращений в системах Ti-6Al-4V-H при гидрировании и дегидрировании в интервале температур 550-700 °С может быть выражена формулой $\alpha+\beta \leftrightarrow \alpha_H+\beta_H \leftrightarrow \beta_H \leftrightarrow \beta_H+\delta \leftrightarrow \delta$. Также фазовое превращение, вызванное гидрированием в Ti-6Al-4V, полностью обратимо [12].

1.2.2 Определение фазовой границы

Фазовые границы определялись в системе Ti-6Al-4V-водород в диапазоне температур от 20 °С до 1000 °С и диапазоне концентрации водорода от 0 до 30 ат.%. В этих диапазонах были идентифицированы три

устойчивые фазы: ГПУ α , ОЦК β и ГЦК δ (гидрид) [14].

Легирование титанового сплава Ti-6Al-4V водородом вызывает превращение $\alpha \rightarrow \beta$, которое определяется температурой и нагревом, а также содержанием водорода. При температуре 900 °С в титановый сплав вводили 0,2 % Н для обеспечения полного перехода в β фазе. Затем его охлаждают до комнатной температуры со скоростью 1 К/с. Если сплав содержит 0,3% Н, β фаза образует α' -мартенсит, а если концентрация находится в диапазоне от 0,3 до 0,7%, образуется α'' мезоморфное тело. Процесс перехода от α' к α'' фазе идентичен $\alpha' \rightarrow \alpha''$ -превращению при легировании титана β изоморфными стабилизаторами [14].

Продолжают увеличивать содержание водорода в сплаве для получения однофазной β фазы при нормальной температуре. Титановый сплав Ti-6Al-4V достигает того же фазового и структурного состояния, что при 900 °С и наводороживания при 850 °С. [14].

После наводороживания при 900 и 850 °С в титановом сплаве Ti-6Al-4V происходят следующие фазовые переходы $(\alpha + \beta) \rightarrow [\alpha'(\alpha'') + \beta] \rightarrow \beta$ с увеличением концентрации водорода. В условиях наводороживания в интервале температур 650-800 °С процесс фазового перехода титанового сплава явно усложняется с увеличением концентрации водорода: $(\alpha + \beta) \rightarrow [\alpha(\alpha_2) + \beta] \rightarrow [\alpha(\alpha_2) + \beta + \delta] \rightarrow [\alpha(\alpha_2)] + \delta$ [14].

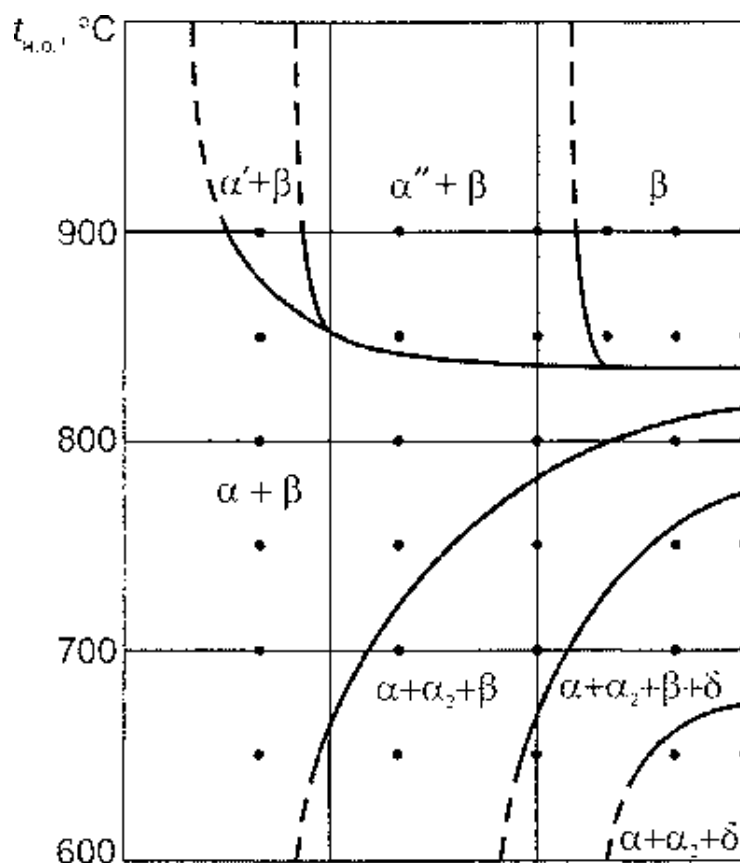


Рисунок 5 – Диаграмма «фазовый состав– концентрация водорода – температура наводороживающего отжига» для сплава Ti-6Al-4V (скорость охлаждения 1 К/с)

Из рисунка хорошо видно, что после наводороживающего отжига при различных температурах и охлаждения со скоростью 1 К/с какая фаза сплава Ti-6Al-4V имеет нормальную температуру после введения заданного количества водорода [14].

Построенная диаграмма имеет большое практическое значение, поскольку позволяет выбирать параметры отжига в среде водорода для получения заданного структурно-фазового состояния в сплаве Ti-6Al-4V [15].

1.3. Водородное охрупчивание

1.3.1 Изменение механических свойств при испытаниях на ударный изгиб по Шарпи

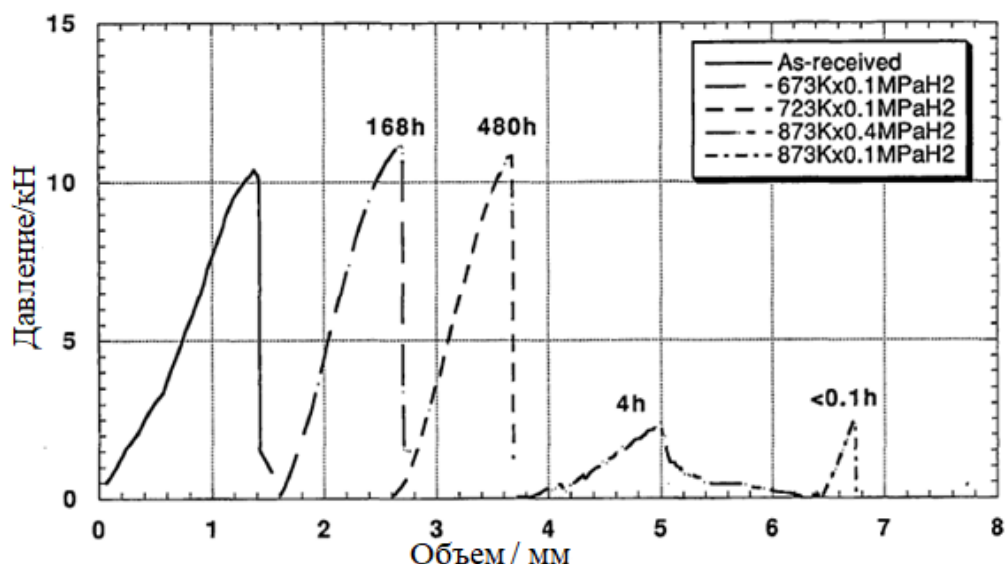


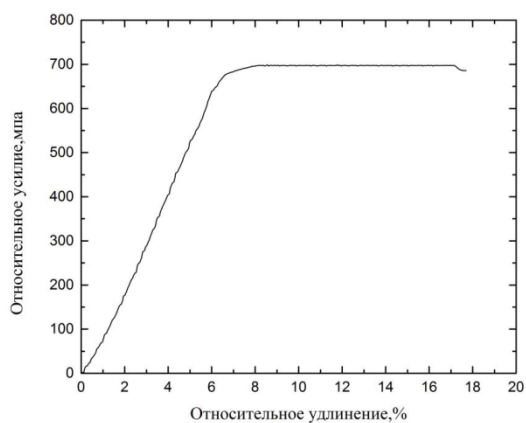
Рисунок 6 – Изгибные кривые нагрузки-смещения образцов Шарпи после длительного воздействия водорода [16].

На рисунок 6 показаны кривые нагрузки-смещения, полученные при испытании на изгиб образцов, подвергнутых воздействию газообразного водорода при 673-873К, с 0-5,0МПа H_2 . Резкое ухудшение прочности отчетливо наблюдается в образцах, подвергшихся воздействию при 873К в течение 4ч, тогда как в образцах, подвергнутых воздействию ниже 723 К, более длительное время не наблюдается изменений [15,16].

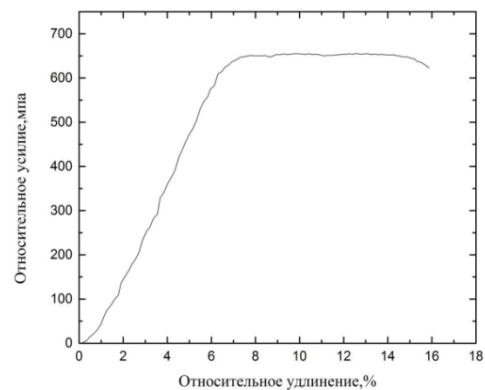
При 673К при давлениях 0,1-4 МПа H_2 образцы сохраняли свои первоначальные формы, но были сильно повреждены при более высоком давлении водорода в течение более короткого времени экспозиции. При 773-823 К при 4,0 - 5МПа H_2 повреждения, вызванные этими особенностями, являются более выраженными при более низкой температуре и давлении, а долгосрочный тест на воздействие проявляет чрезвычайно серьезный ущерб для этих образцов. При 873К образцы, подвергшиеся воздействию более высокого давления до 4,0 МПа H_2 с более длительным временем воздействия или более низким давлением, чем 1МПа, с более коротким временем сохраняли свои первоначальные формы, за исключением образца, подвергнутого воздействию 1,0МПа H_2 в течение 0,1 ч [15,16] .

1.3.2 Изменение механических свойств при одноосном растяжении

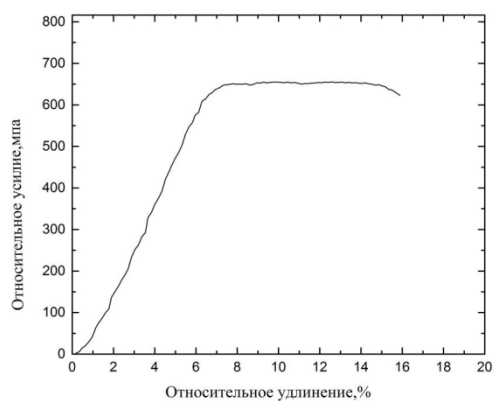
После наводороживания образцов их механические свойства были исследованы методом одноосного растяжения. В результате были получены данные, представленные на рисунках 7 [17].



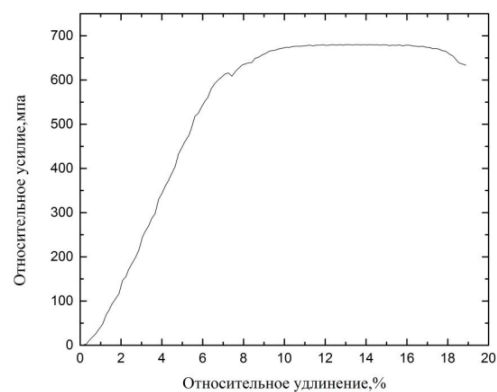
а



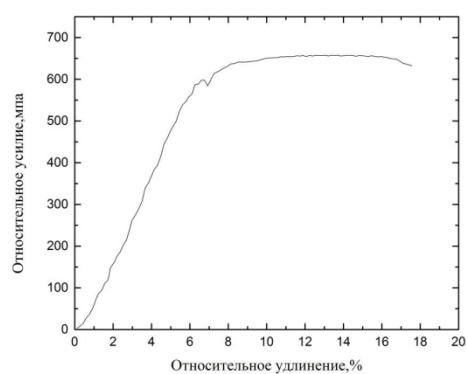
б



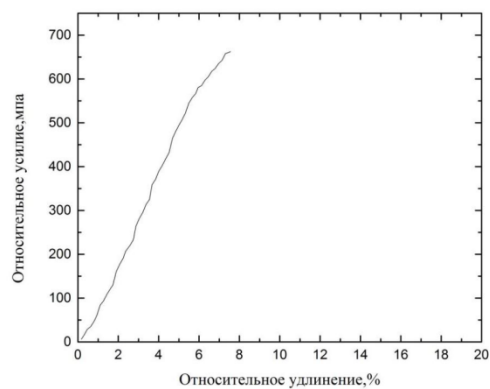
в



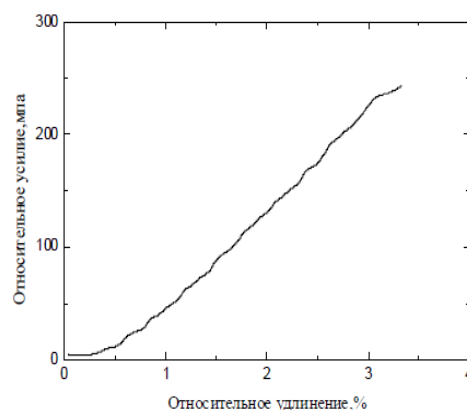
г



д



е



Ж

Рисунок 7 – Кривые растяжения образцов сплава Ti-6Al-4V до насыщения (а) и с различным содержанием водорода: 0,06 масс.% (б); 0,097 масс.% (в); 0,11 масс.% (г); 0,15 масс.% (д); 0,28 масс.%(е); 0,34 масс.% (ж) [17].

Одноосные испытания на растяжение показали, что насыщение водородом в диапазоне концентраций до 0,097 масс.% приводит к увеличению прочности и предела текучести, уменьшению относительного удлинения. При концентрации водорода 0,28 масс.% наблюдается переход от пластической деформации к хрупкой. В этом случае даже при концентрации 0,34 масс.% образец ломается хрупким на эластичной части кривой растяжения [17].

Механические свойства представлены в таблице 2.

Таблица 2. Механические свойства сплава Ti-6Al-4V в различных состояниях.

Концентрация водорода, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ϵ , %	E, МПа
0.002	540	597.2	17.7	96.3
0.097	650	721.4	12.1	92.8
0.28	630	-	7.6	90.2

Водородная обработка может увеличить предел текучести при комнатной температуре титанового сплава Ti-6Al-4V, предел прочности и усталостную прочность, но уменьшить пластичность [18]. При концентрации водорода 0,28 мас.% наблюдается переход от пластической деформации к хрупкой. При этом уже при концентрации 0,34 мас.% и выше образец разрушается хрупко на упругой части кривой растяжения [19,20].

1.3.3 Изменение механических свойств при разрушении.



Рисунок 8 – Соотношение между нагрузкой на изломанный перелом и содержанием водорода в образцах, подверженных воздействию водородной среды [21]

Рисунок 8 показывает кривую разрушения при комнатной температуре в зависимости от содержания водорода. По представленному графику, что титановый сплав Ti-6Al-4V испытывает вязкое разрушение, когда содержание водорода составляет менее 0,19 масс.%. Титановый сплав Ti-6Al-4V испытывает вязко-хрупкое разрушение, когда содержание водорода находится в диапазоне (0,19-1,0) масс.%. При увеличении концентрации водорода выше 1 масс.% сплав испытывает только хрупкое разрушение. Ухудшения механических свойств титановый сплав Ti-6Al-4V при концентрации водорода менее 0,1 масс.% Н не происходит [21].

ГЛАВА 2. Приборы и методы исследования

2.1 Подготовка образцов

После резки металлического образца поверхность становится шероховатой и имеет сильно деформированный слой. Чтобы удалить царапины, слои ржавчины, ямки и деформации на поверхности металлического образца его можно механически отшлифовать и отполировать [22].

Шлиф является важной частью при подготовке образца. Он не только полирует образец, но и удаляет слой повреждения и деформации, вызванный перехватом во время процесса полировки [22].

Оба процесса (тонкое шлифование и полировка) представляют собой удаление абразивных мелких металлических частиц с поверхности металла. Конечно, новые деформационные слои неизбежно образуются в процессе тонкого шлифования. Следовательно, в процессе тонкого шлифования следует обратить внимание на выбор и способ эксплуатации наждачной бумаги, а процесс шлифования должен быть разумно сформулирован, чтобы минимизировать деформацию слоя. [23].

2.1.1 Тонкая шлифовка.

Наждачная бумага, используемая в процессе тонкого шлифования, является водостойкой наждачной бумагой [22]

Толщина абразивного зерна на наждачной бумаге является важным показателем нумерации наждачной бумаги, как показано в таблице 3 [23].

Таблица 3. Дисперсность частиц наждачной бумаги по ГОСТ

ГОСТ Р 52381-2005 (Россия)	Размер зерна (мкм)
P80	200-250
P150	80-100
P240	50-63
P280	40-50
P400	28-40
P600	20-28

P1000	14-20
P1200	10-14
P1500	7-10
P2000	5-7
P2500	3-5

Ручное шлифование является наиболее распространенным методом в лабораторных условиях. Поместите наждачную бумагу на стеклянную пластину и зафиксируйте ее клеем, затем осторожно прижмите поверхность образца к наждачной бумаге рукой и протолкните ее вперед, чтобы шлифовать [23].

2.1.2. Полировка.

Целью полировки является удаление следов износа, оставленных тонким шлифованием на поверхности металлического образца до зеркального состояния. При полировке металлического образца необходимо провести большую работу, поскольку эффект полировки может удалить только очень тонкий слой металла из поверхностного слоя, а результат полировки во многом зависит от качества предыдущих процессов. Иногда перед шлифованием поверхности на шлифовальной поверхности оставляют небольшое количество глубоких следов износа, и их трудно удалить, даже если время полировки увеличивается, и, как правило, необходимо повторять процедуру полировки. Поэтому поверхность должна быть тщательно проверена перед полировкой. Существует ли тонкий износ в одном направлении или его необходимо повторно отполировать, чтобы избежать потери времени. Это важная часть повышения эффективности подготовки металлических образцов [26].

Полировочный микропорошок играет роль существенную роль во времени подготовки поверхности образца. Требуется, чтобы микропорошок обладал высокой прочностью и твердостью, однородным размером частиц и многоугольной формой, чтобы обеспечить высокое качество полировки образца. Полировальный микропорошок можно использовать для

приготовления полирующей суспензии, полирующего спрея или полирующей пасты [26].

2.1.3 Отжиг.

Отжиг, в металлургии и материаловедении, - это термическая обработка, которая изменяет физические, а иногда и химические свойства материала, для повышения его пластичности и снижения его твердости. Он включает нагревание материала выше его температуры рекристаллизации, поддержание подходящей температуры в течение заданного времени с последующим охлаждением [25].

При отжиге атомы мигрируют в кристаллическую решетку, а число дислокаций уменьшается, что приводит к изменению пластичности и твердости. Когда материал охлаждается, он перекристаллизовывается. Для многих сплавов, включая углеродистую сталь, размер кристаллического зерна и фазовый состав, которые в конечном счете определяют свойства материала, зависят от нагрева и скорости охлаждения. Горячая обработка или холодная обработка после процесса отжига изменяют металлическую структуру, поэтому для достижения требуемых свойств могут использоваться дополнительные термообработки. Со знанием состава и фазовой диаграммы термическая обработка может быть использована для регулирования между более твердой и более хрупкой, более мягкой и более пластичной структурой [27].

Ниже температуры фазового перехода прочность, пластичность и ударная вязкость материала уменьшаются с увеличением температуры отжига. С увеличением скорости охлаждения прочность материала увеличивается, а пластичность и ударная вязкость уменьшаются [28].

Сплав ВТ6 в соответствии с различными потребностями, может использоваться для снятия напряжений отжиг (600 °С, воздушное охлаждение), Перекристаллизационный отжиг (940 °С, охлаждение печи до 480 °С), И двойной отжиг (940°С воздушного охлаждения и 700°С воздушного охлаждения), И другие процессы термообработки. Структура,

получаемая при снятии напряжения, и обычном отжиге, не перекристаллизована или частично перекристаллизована, а прочность высокая; После двойного отжига получается равноосная структура $\alpha + \beta$, которая близка к микроструктуре двух состояний и имеет хорошие всесторонние характеристики [28].

В качестве исследуемого материала был использован титановый сплав ВТ6. Образцы представляли собой прямоугольные пластины размером 20x20x1 мм³.

На первом этапе работы образцы были подвержены механической шлифовке и полировки для удаления поверхностных загрязнений.. Снятие внутренних напряжений и частичный отжиг дефектов были осуществлены путем термообработки при температуре 750 °С в течение 1 часа.

2.2 Насыщение водорода

Для насыщения образцов водородом использовался автоматизированный комплекс Gas Reaction Controller, схема которого представлена на рисунке 9. Комплекс используется для наводороживания образцов до заданной концентрации.

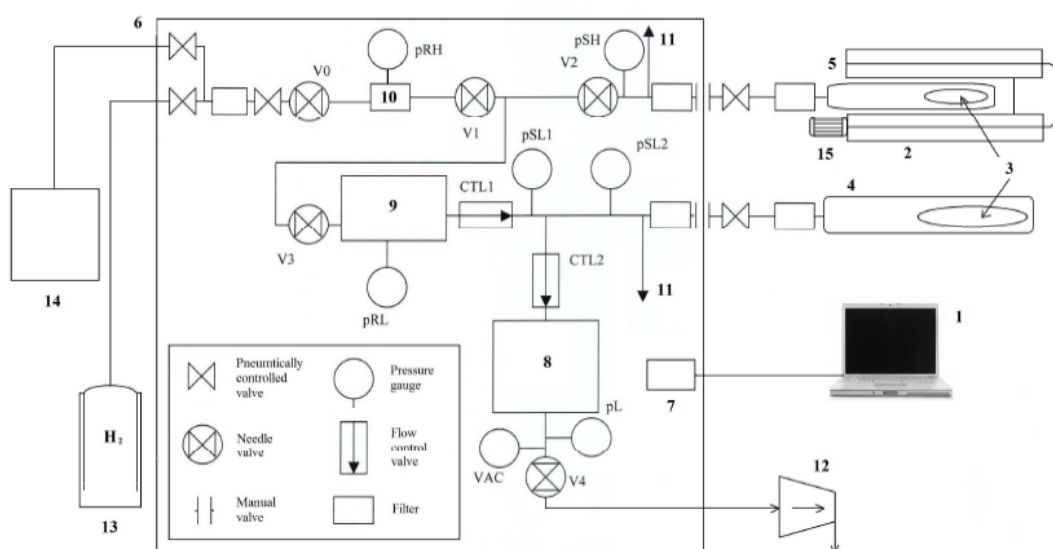


Рисунок 9 – Схема автоматизированного комплексного Gas Reaction Controller: 1 – компьютер; 2 – криостат; 3 – образец; 4 – камера низкого давления; 5 – камера высокого давления; 6 – контроллер; 7 – электронная

система управления; 8 – контрольный объем; 9 – резервуар низкого давления; 10 – резервуар высокого давления; 11 – система аварийного удаления водорода; 12 – вакуумный узел; 13 – цилиндр с водородом; 14 – генератор водорода; 15 – система охлаждения



Рисунок 10 – Принцип работы автоматизированного комплекса GRC

Заданное количество водорода напускается в резервуар и определяется его молярный объем по давлению и температуре. Затем открывается клапан между резервуаром и реакционной камерой, и водород передается из резервуара в реакционную камеру. После внедрения водорода в твердое тело реакция завершается, и вычисляется общее молярное количество водорода в камере с образцом и в резервуаре [29].

Эксперимент по исследованию процессов сорбции и десорбции водорода выполняются в следующем порядке:

1. Образец взвешиваются и записывают данные.
2. Образец помещают в камеру, камера плотно закрывается, чтобы предотвратить утечку.
3. Проводится вакуумирование до давления порядка $2 \cdot 10^{-3}$ Па.
4. Насыщение экспериментальных образцов водородом при температуре 500 °С и давлении 0.5 атмосферы

Скорость линейного нагрева составляла 6 °/мин.

2.3 Рентгеновская дифракция

Рентгенодифракционный анализ – один из дифракционных методов исследования структуры вещества. В основе данного метода лежит явление дифракции рентгеновских лучей. При выполнении условия Вульфа-Брэггов наблюдаются интенсивные пики рассеяния [30]

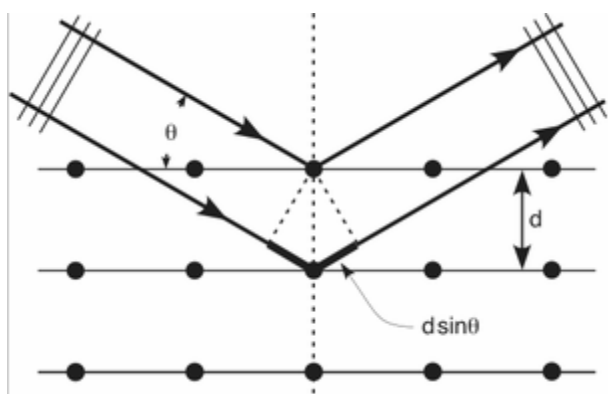


Рисунок 11 – Схема падения (θ) и отражения рентгеновского луча

Условие Вульфа — Брэггов определяет направление максимумов дифракции упруго рассеянного на кристалле рентгеновского излучения.

$$2d \cdot \sin 2\theta = n\lambda$$

где d — межплоскостное расстояние,

θ — угол скольжения,

n — порядок дифракционного максимума,

λ — длина волны.

Для получения дифрактограмм используются рентгеновские дифрактометры. Принципиальная схема дифрактометра показана на рисунке 11. Основными компонентами дифрактометра являются рентгеновская трубка и детектор, размещенный на мобильном устройстве, называемом гониометром. Это система для точной установки и отслеживания угла излучения относительно поверхности образца. Одно плечо гониометра определяет угол экспозиции образца с помощью рентгеновской трубки, а другой определяет угол брэгговского отражения излучения от образца (детектируемый сигнал). Детектор непрерывно во время движения (с изменением угла) регистрирует интенсивность рентгеновского излучения. Остальные части оптической схемы дифрактометра дают излучение таких свойств, чтобы оптимизировать его для решения различных задач дифракционных исследований [30].

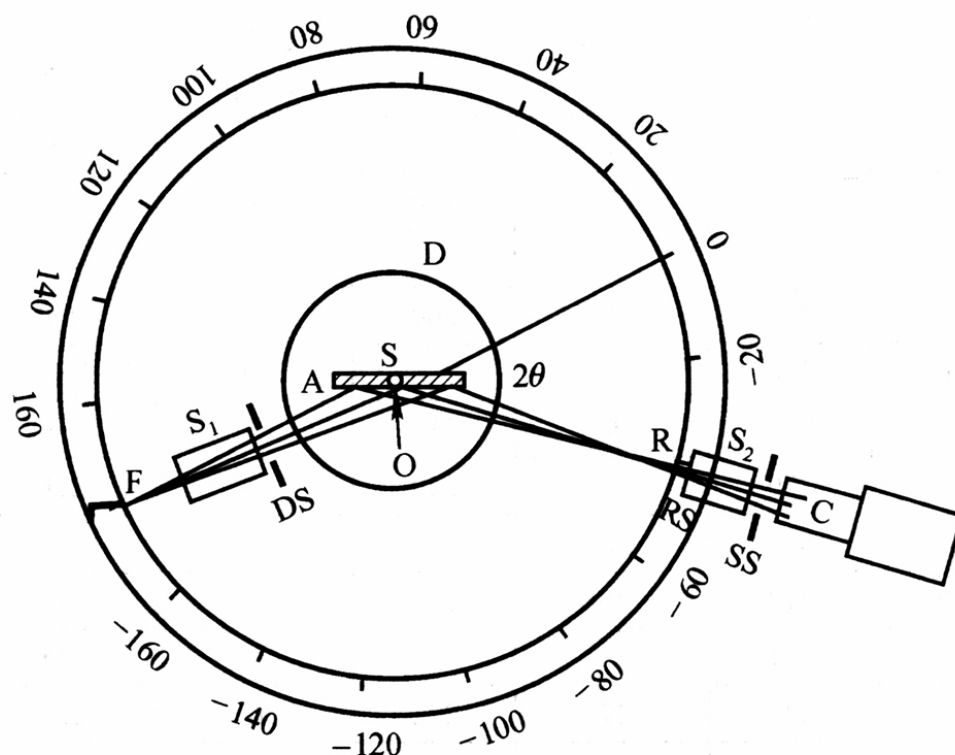


Рисунок 12 – Принципиальная схема дифрактометра, F, линейный источник рентгеновских лучей от анода рентгеновской трубки; S_1 , щели разрезателя (коллиматор); DS, расходящаяся щель; Ось А, вокруг которой вращаются образец и детектор; S, образец; R, получающая щель; S_2 , приемные разрезы; SS, рассеивающая щель; C, детектор

Применение высокоточного вертикального гониометра позволяет анализировать различные образцы, такие как порошки, тонкие пленки, труднорастворимые и легкоплавкие образцы [31].

Все управление работой оборудования осуществляется с помощью компьютера. Возможно одновременное измерение и обработка данных [32].

Основными параметрами исследования на дифрактометре являются: анодный материал и радиационный фильтр K_β (или используемый монохроматор);

- значение высокого напряжения в киловольтах и ток через трубу в миллиамперах;
- тип счетчика;
- используемая шкала счетчика импульсов;

– скорость счетчика в градусах в минуту и диаграмма ленты в миллиметрах в час;

– интервал между штрихами маркера в градусах; размеры вертикальных прорезей на трубе и счетчика в миллиметрах.

Анализ фазовых и структурных изменений осуществлялись методами рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии.

Дифракционные картины были получены с использованием $\text{CuK } \alpha$ излучения (длина волны $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000S в геометрии Брэгга-Брентано при следующих параметрах: диапазон углов $2\theta \sim (30-80)^\circ$, скорость сканирования $10^\circ/\text{мин}$, шаг сканирования $0,0143^\circ$, время экспозиции в точке 42,912 сек, напряжение 40 кэВ, ток 30 мА.

2.4 Просвечивающая электронная микроскопия

ПЭМ работает по схеме пропускания электронных пучков в отличие от металлографического микроскопа, в котором изображение формируется отраженными лучами света. Источник света в электронном микроскопе заменяется источником электронов, вместо стеклянной оптики используются электромагнитные линзы (для преломления электронных пучков) [34].

ПЭМ состоит из электронной пушки для создания пучка быстрых электронов и системы электромагнитных линз. Электронную пушку и систему электромагнитных линз помещают в колонку микроскопа, в которой поддерживается вакуум $10^{-2}-10^{-3} \text{ Па}$ во время работы микроскопа [35].

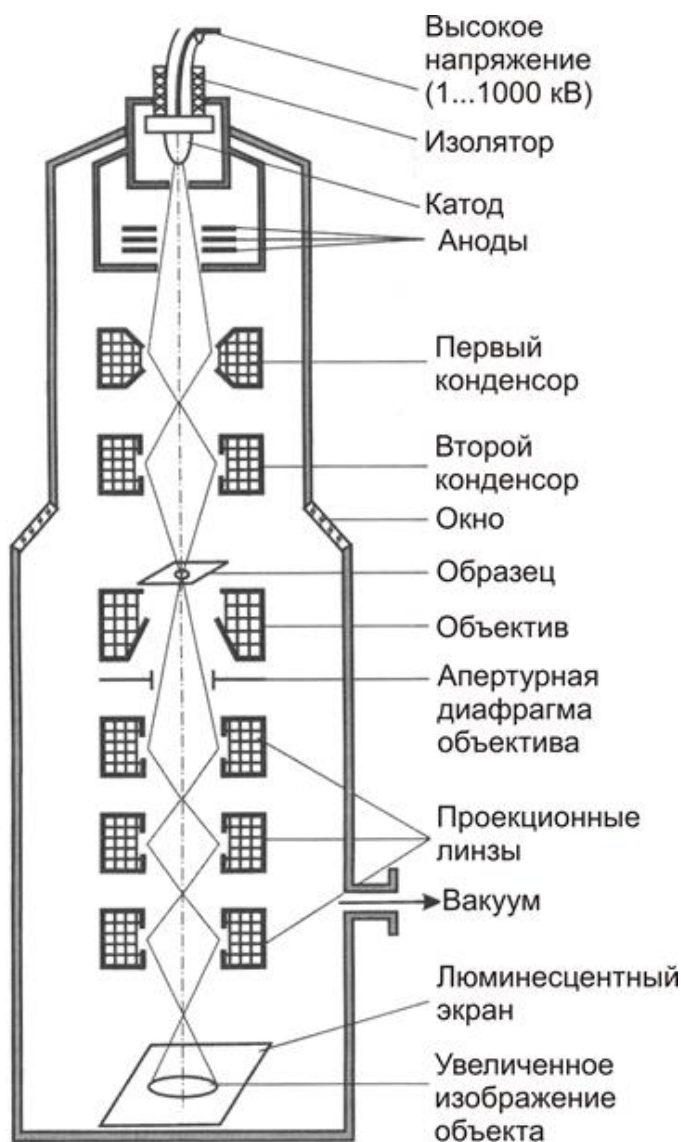


Рисунок 13 – Принципиальная схема просвечивающего электронного микроскопа

Основная оптическая схема ПЭМ показана на рисунке 13. В электронной пушке катодная накаливаемая вольфрамовая нить излучает электроны, которые ускоряются к аноду мощным электрическим полем, проходят через анодное отверстие. Полученный узкий интенсивный пучок быстро летящих электронов вводится в систему электромагнитных линз электронного микроскопа [36].

После фокусировки двухступенчатой электромагнитной линзы (конденсатора) электронные лучи, проходящие через объект, рассеиваются и дополнительно сфокусированы объективной линзой, образующей первичное изображение части объекта, просматриваемой электронами. Объективная

линза дает увеличение примерно в 100 раз. Следующая промежуточная линза смещает промежуточное изображение с небольшим увеличением (обычно до 10 раз) на объектную плоскость проекционной линзы, а проекционная линза образует конечное сильно увеличенное изображение (проекционная линза дает увеличение до 100 раз). Таким образом, общее увеличение электронного микроскопа может достигать 100 000 раз [37].

Микроструктура образцов исследовалась на просвечивающем электронном микроскопе JEOL JEM-2100F при ускоряющем напряжении 200 кэВ. Подготовка образцов осуществлялась ионной резкой на специальной установке JEOL Ion Slicer EM-09100IS при следующих параметрах: рабочий газ – аргон, ускоряющее напряжение 8 кэВ, диапазон углов резки (1,5-4)°.

2.5 Дифракционный комплекс

Дифракционный комплекс для исследования фазовых и структурных изменений в поликристаллических материалах в условиях повышенной температуры и газовой среде был разработан на базе лабораторного рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD 7000 [38]. Схема разработанного комплекса представлена на рисунке 14.

Высокотемпературные измерения обеспечиваются за счет использования высокотемпературной камеры НТК 2000N. Металлическая пластина из вольфрама или платины используется в качестве нагревателя. Пластина нагревается резистивным методом [39].

Проведение высокоскоростных измерений осуществлялось за счет использования матричного 1280 канального детектора OneSight, установленного на дифракционный комплекс.

Фазовые переходы в титановом сплаве ВТ6 при газофазном наводороживании были получены на разработанном дифракционном комплексе. Образец помещали в высокотемпературную камеру, вакуумировали до остаточного давления $2 \cdot 10^{-4}$ Па и линейно нагревали со скоростью 5 ° / мин.

Наводороживание проводили при температуре 500 °С, а давление

водорода в реакционной камере составляло 0,5 атм. Во время нагревания и гидрирования дифракционная картина регистрировалась при времени экспозиции 5 минут / кадр в диапазоне углов дифракции 2θ -(35-45) °.

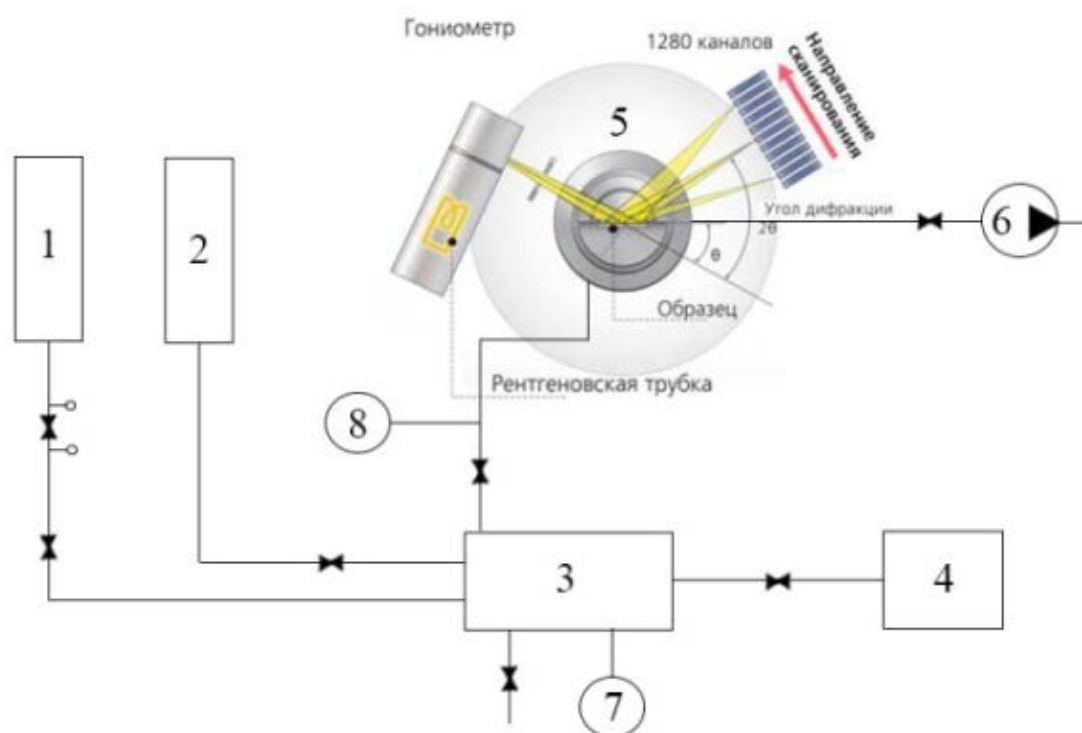


Рисунок 14 – Принципиальная схема дифракционного комплекса: 1 – баллон инертного газа (аргон, гелий); 2 – генератор водорода; 3 – газовый смеситель; 4 – камера временного хранения газа; 5 – высокотемпературная камера; 6 – вакуумный пост; 7, 8 – датчики давления

В таблице показаны его технические характеристики.

Таблица 4.

Технические характеристики	
Временное разрешение	1 минута
Угловое разрешение	0,0104° по 2θ
Диапазон температур	(25-2300) °C
Диапазон давлений	$(2 \cdot 10^{-3} - 10^5)$ Па
Инертные газовые среды	Гелий, аргон, азот
Агрессивные газовые среды	Водород, кислород

ГЛАВА 4. Социальная ответственность

Введение: В эти современные времена сложных автоматических аналитических инструментов новые потенциальные опасности для жизни и конечности можно найти в неправильном использовании блестящих установки, которые автоматизируют анализ и много часов автоматической работы. Особо следует отметить в этой категории те инструменты, которые используют ионизирующие излучения и представляют особый интерес в этой разделе для тех, которые используют рентгеновское излучение. В данной главе рассмотрены правила безопасной работы труда при выполнении основных этапов осуществления эксперимента.

Исследовательская работа по структуре и свойствам титанового сплава ВТ6, насыщенного водородом, предполагает работу на различных установках. К наиболее критическому оборудованию относится рентгеновский дифрактометр и автоматизированный комплекс GRC. Поэтому рассмотрение безопасности и гигиены труда при осуществлении работ по измерению с помощью установки дифрактометра Shimadzu XRD-7000S и автоматизированный комплекс GRC особенно важны при проведении данного исследования.

4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

4.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.

Рассмотрение безопасности и гигиены труда при осуществлении работ по измерению с помощью установки дифрактометра Shimadzu XRD-7000S и автоматизированный комплекс GRC особенно важны при проведении данного исследования.

По данной теме рассматриваются законодательный и нормативные документы:

1. ГОСТ 12.1.006–84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.
2. ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные помещения.

Параметры микроклимата в помещении;

3. ГОСТ 12.1.005 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны;

4. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

5. ГОСТ 12.1.003–2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

6. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума.

Классификация

7. ГОСТ Р 22.0.01-94. Безопасность в ЧС. Основные положения.

8. ГОСТ Р 22.3.03-94. Безопасность в ЧС. Защита населения. Основные положения.

9. ГОСТ Р 22.0.07-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники техногенных чрезвычайных ситуаций. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров.

4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.

Разработать хорошие меры в области радиационной безопасности

Существует несколько мер предосторожности, которые могут использовать операторы рентгеновского оборудования, чтобы уменьшить вероятность аварии на радиации. Тщательные лучевые обследования всегда должны выполняться на вновь установленном или модифицированном оборудовании. Кроме того, всегда должен находиться рядом с оборудованием измерительный прибор, так что случайные обследования могут выполняться часто.

Для каждого объекта лицо назначается ответственным за радиационную безопасность.

Только обученный персонал, одобренный руководителем радиационной защиты, должен иметь возможность устанавливать, переупаковывать или производить иные, чем обычные модификации рентгеновского генератора и корпуса трубки-аппарата.

4.2 Профессиональная социальная безопасность.

4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования и возникнуть в лаборатории.

При проведении работ на установке рентгеновского дифрактометра и автоматизированного комплекса GRC возможно воздействие вредных факторов таких, как:

4. Микроклимат;
5. Производственный шум
6. Электромагнитные излучения

При работе с вакуумными и турбомолекулярными насосами. Влияние шума на организм человека является причиной негативных изменений, особенно в органах слуховой, нервной и сердечно-сосудистой систем. В соответствии с ГОСТ 12.1.003-83 допустимый уровень шума для работ, требующих концентрации, работы с повышенными требованиями к мониторингу и дистанционным контролем производственных циклов на рабочих местах в лабораториях с шумовым оборудованием составляет 75 дБА. Области с акустическим уровнем или эквивалентным уровнем шума выше 80 дБА обозначены знаками безопасности в соответствии с ГОСТ 12.4.026. Рекомендуется использовать следующие средства коллективной защиты: ограждения, объемные звукопоглотители, виброизолирующие опоры; средства индивидуальной защиты: специальные вкладыши, вкладыши для ушных вкладышей, защитные колпачки.

Опасности при использовании рентгеновских лучей представляют собой энергетические электромагнитные излучения, которые ионизируют вещество, с которым они взаимодействуют, выталкивая электроны из своих атомов. Степень ионизации, поглощения и изменения молекул на материале зависит от величины (потока и интенсивности излучения) и качества (спектрального распределения энергии фотона) излучения. Живые организмы, подвергающиеся воздействию различных доз ионизирующего излучения, могут быть ранены в результате таких воздействий, а смерть может быть

вызвана сильными воздействиями. Крайне важно, чтобы все операторы рентгеновских приборов были осведомлены об их использовании, чтобы защитить себя от травм.

При нормализации метеорологических условий в производственных помещениях учитывается время года, физическая тяжесть выполняемой работы, а также количество избыточного тепла в помещении. Оптимальные и допустимые метеорологические условия температуры и влажности устанавливаются в соответствии с СанПин 2.2.4.548-96 (таблица 5).

Таблица 5. Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений (СанПин 2.2.4.548-96)

Период года	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
холодный	21-23	20-24	60-40	0,1
теплый	22-24	21-25	60-40	0,1

Системы кондиционирования воздуха обеспечивают создание и автоматическое поддержание определенных параметров окружающей среды в помещении, независимо от погодных условий.

4.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.

1. Рекомендуется использовать следующие средства коллективной защиты: ограждения, объемные звукопоглотители, виброизолирующие опоры; средства индивидуальной защиты: специальные вкладыши, вкладыши для ушных вкладышей, защитные колпачки.

2. Системы кондиционирования воздуха обеспечивают создание и автоматическое поддержание определенных параметров окружающей среды в помещении, независимо от погодных условий.

3. Излучение, возникающее в источнике высокого напряжения (то есть трансформатор и выпрямители), не должно превышать 0,5 мР за 1 час при каждом номинальном значении на расстоянии 5 см от корпуса источника питания.

4. Для рентгеновской дифракции и спектрографического оборудования, в котором полностью закрыт первичный рентгеновский луч, блуждающее излучение на расстоянии 25 см от комплекса корпусных корпусов трубки, измеренное с помощью мотора, соответствующего энергиконтролируемый диапазоном, должен быть уменьшен до минимального уровня и должен быть менее 2 мР за 1 час при каждом заданном рейтинге трубки.

5. Для рентгеновского оборудования с открытым пучком применяются следующие предписания:

(а) Легко видимые мигающие огни или другие одинаково заметные сигналы, которые срабатывают только при отпуске первичного рентгеновского луча (т. Е. Активируется рентгеновская трубка и отверстия пучка) должны быть обеспечены таким образом, чтобы предупреждать людей о потенциальной радиационной опасности. Этот сигнал должен быть помечен так, чтобы его назначение было легко идентифицировано. (b) Оператор должен находиться в непосредственном присутствии во все времена, когда оборудование работает. Отклонения от этой практики должны быть очищены через наблюдателя радиационной защиты. (с) Если оборудование не эксплуатируется, оборудование должно быть выключено таким образом, чтобы оно было доступно или работало только уполномоченным персоналом. Комментарий: поскольку скорость воздействия на порт луча может превышать 100 000 об / мин, экстремальные воздействия необходимы для предотвращения случайного воздействия первичного пучка. По этой причине технологии с открытым пучком следует использовать только после исчерпания всех других возможностей.

6. Каждый комплекс корпусных корпусов должен быть таким, чтобы предотвратить попадание частей тела в путь первичного луча излучения или вызвать перекрытие первичного луча излучения при входе в его путь.

7. Индикатор состояния затвора (открытый или закрытый) должен быть установлен на корпусе трубки или рядом с ним, что будет автоматически указывать положение каждого затвора с легко различимым образом.

8. Знак или ярлык с надписью «Предостережение-излучение – это оборудование производит рентгеновское излучение при включении - только для квалифицированного персонала» или слова, имеющие сходные намерения, должны располагаться рядом с любым переключателем, который активирует рентгеновское излучение труба. Знак или ярлык должны использовать обычные радиационные предостерегающие цвета (пурпурный на желтом фоне) и должны иметь обычный символ излучения.

9 . Знак или ярлык с надписью «Предостерегающий высокоинтенсивный рентгеновский луч» или слова, имеющие сходные намерения, должны быть размещены на каждом корпусе рентгеновской трубки или рядом с ним. Он должен быть расположен так, чтобы быть хорошо видимым для любого человека, который может работать в непосредственной близости от первичного луча излучения.

10. Красная или пурпурная сигнальная лампа с обозначением «X-Ray On» или ее эквивалент должны быть расположены на панели управления и загораться, только если рентгеновская трубка активирована. Кроме того, на корпусе трубки или рядом с каждым корпусом трубки должен быть включен индикатор состояния (вкл. Или выкл.) Маркированной рентгеновской трубки, предпочтительно красный или пурпурный свет, так что состояние трубки легко различимо.

11. Машины, использующие рентгеновскую дифракционную камеру,

должны иметь соответствующие отверстия корпуса рентгеновской трубки, расположенные так, чтобы:

(а) Рентгеновская трубка могла быть активирована только тогда, когда система коллимирования камеры установлена на место, или (б) Механизм затвора позволяет первичному лучу излучения проходить только тогда, когда система коллимирования камеры находится на своем месте.

12 . Связь между рентгеновской трубкой и коллиматором дифрактометра, камеры или другого аксессуара должна предотвращать вытекание рентгеновских лучей из муфты.

13. Защитные блокировки не должны использоваться для деактивации рентгеновского луча, за исключением чрезвычайной ситуации или во время тестирования системы блокировки. Если блокировочная система отключает рентгеновский луч, возобновить работу невозможен без сброса переключателя «ON» пульта на панели управления.

14 . Все предохранительные устройства (блокировки, жалюзи, сигнальные лампы и т. Д.) Должны периодически проверяться, чтобы обеспечить их надлежащую работу. Эти тесты должны проводиться не реже одного раза в месяц. Записи таких тестов должны быть сохранены.

15. Все отверстия в головке проводов, которые не используются, должны быть запечатаны в закрытом положении таким образом, чтобы предотвратить случайное открытие. Покрытия для портов должны обеспечивать такую же степень защиты, как требуется от корпуса трубки (см. Пункт 14).

16. Следует использовать постоянное экранирование, предпочитая временную защиту. Комментарий: свинцовую фольгу следует использовать осторожно, так как она легко искажается и может допускать утечку радиации.

17. Рентгеновская дифракция и спектрографическое оборудование должны быть помещены в комнату отдельно от других рабочих мест, когда это возможно.

4.3 Экологическая безопасность.

4.3.1 Анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду.

При выполнении работы возможно воздействие следующих опасных производственных факторов:

1. Загрязнение окружающей среды, вызванное утечкой электромагнитного излучения;
2. Загрязнение окружающей среды от экспериментальных отходов
3. Взрыв, вызванный высокими температурами

Влияние электрического напряжения на человека связано с протекающим через него током. Прохождение тока может вызвать раздражение и повреждение различных органов у человека. Порог не возбуждающего тока составляет 50 Гц (6-16 мА). Защита от воздействия электрического тока осуществляется посредством организационных, инженерных и медицинских и профилактических мероприятий.

Индивидуальные основные изоляционные средства защиты от электропитания могут выдерживать рабочее напряжение электроустановок в течение длительного времени.

Цель защитного отключения - обеспечить электробезопасность, которая достигается путем ограничения времени воздействия опасного тока на человека. Защита осуществляется специальным защитным устройством (УЗО), которое, работая в режиме ожидания, постоянно контролирует условия травмы человека электрическим током. В электротехнике заземление используется для снижения напряжения касания до безопасного значения для людей и животных.

При работе на установке используются баллоны с аргоном и азотом.

Работа баллонов связана с рядом опасных факторов. Цилиндр, заполненный сжатым газом, имеет высокую температуру, и если в нем образуются дырки, газ выходит из него с критической скоростью.

4.3.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.

В этой работе отходы представляют собой металлические порошки, полученные в результате очистки камеры и других компонентов установки.

Использование металлических отходов состоит из нескольких технологических операций, в том числе:

1. проверка металлических отходов (в том числе дозиметрических);
2. отделение отходов черных металлов от отходов цветных металлов;
3. Разделение различных неметаллических примесей;
4. окончательный контроль отходов;
5. обработка.

Не открывайте крышку нагретой духовкой, не прикасайтесь к камере или не одевайте одежду, чтобы избежать термических ожогов при работе с установкой, в которой размещен образец. Работа с контроллером газовой реакции должна проводиться в чистой комнате, свободной от пыли, паров, кислот и щелочей, агрессивных газов и других вредных примесей, что вызывает коррозию. Недопустимо иметь открытый огонь рядом с прибором.

Исследовательские проекты могут включать частые модификации аналитического рентгеновского оборудования, и часто возникает связанное с этим увеличение потенциальной радиационной опасности. Для охраны окружающей среды, возникающими на таких машинах, необходимы специальные усилия:

(a) Обследование радиационной защиты должно производиться непрерывно и должно производиться после каждой модификации устройства.

(b) Операторы оборудования должны носить устройства для контроля излучения, предпочтительно пальцев или запястья.

4.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

4.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может возникнуть в лаборатории и

инициировать объект исследований.

Чрезвычайная ситуация представляет собой ситуацию в той или иной области, которая возникла в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которое может привести к гибели людей, нанесению ущерба здоровью человека или окружающей среде, значительные материальные потери и уничтожение средств существования людей.

Рассмотрим две наиболее распространенные чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть на предприятии.

Первый случай: прекращение производства в результате сильных морозов.

Второй случай: искусственное разрушение.

Третий случай: внезапная утечка радиоактивного материала

4.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.

1. Повышение устойчивости системы электроснабжения. Прежде всего, целесообразно заменить воздушные линии электропередачи кабельными (подземными) сетями, использовать резервные сети для потребителей электроэнергии, обеспечить резервные источники питания объекта (мобильные электрогенераторы).

2. Обеспечение стабильности теплоснабжения, системного звонка, углубления теплотрасс.

3. Обеспечение устойчивости системы водоотведения. Повышение устойчивости канализационной системы путем создания резервной сети трубопроводов, через которую загрязненная вода может быть отведена в случае отказа основной сети. Необходимо разработать схему аварийного сброса сточных вод непосредственно в водоемы. Насосы, используемые для откачки загрязненной воды, держа надежные источниками питания.

4. Установить предупредительные системы безопасности для несанкционированного доступа к предприятию в нерабочее время.

5. Письменные аварийные процедуры, касающиеся радиационной безопасности, устанавливаются для каждого объекта руководителем по защите от радиации и должны размещаться в удобном месте рядом с каждой рентгеновской дифракционной или спектрографической единицей. В них должны быть указаны номера телефонов врача и инспектора по радиационной защите и, как минимум, должны содержать инструкции для следующих действий, которые необходимо предпринять в случае известной или предполагаемой аварии, связанной с радиационным воздействием.

6. (a) Уведомление начальника радиационной защиты. (b) Организовать медицинское обследование, не забудьте уведомить обследующего врача, что может произойти облучение рентгеновскими лучами с низкой энергией.

7. Если по какой-либо причине временно необходимо изменить предохранительные устройства, например, в обход блокировок или снятие экранирования, такое действие должно быть: (a) указано в письменной форме, одобрено уполномоченным органом по радиации и размещено вблизи корпус рентгеновской трубки, чтобы другие люди знали о существующем состоянии машины. (b) Прекращено как можно скорее.

8. Для всех работников, участвующих в использовании рентгеновского оборудования с открытым пучком, требуется мониторинг персонала (предпочтительные палец или запястье).

9. Данные о контроле за персоналом должны сохраняться в качестве постоянной записи супервизором радиационной защиты и должны быть доступны для изучения всем соответствующим персоналом.

10. Создать маршруты аварийного эвакуации и разработать планы аварийного спасения.

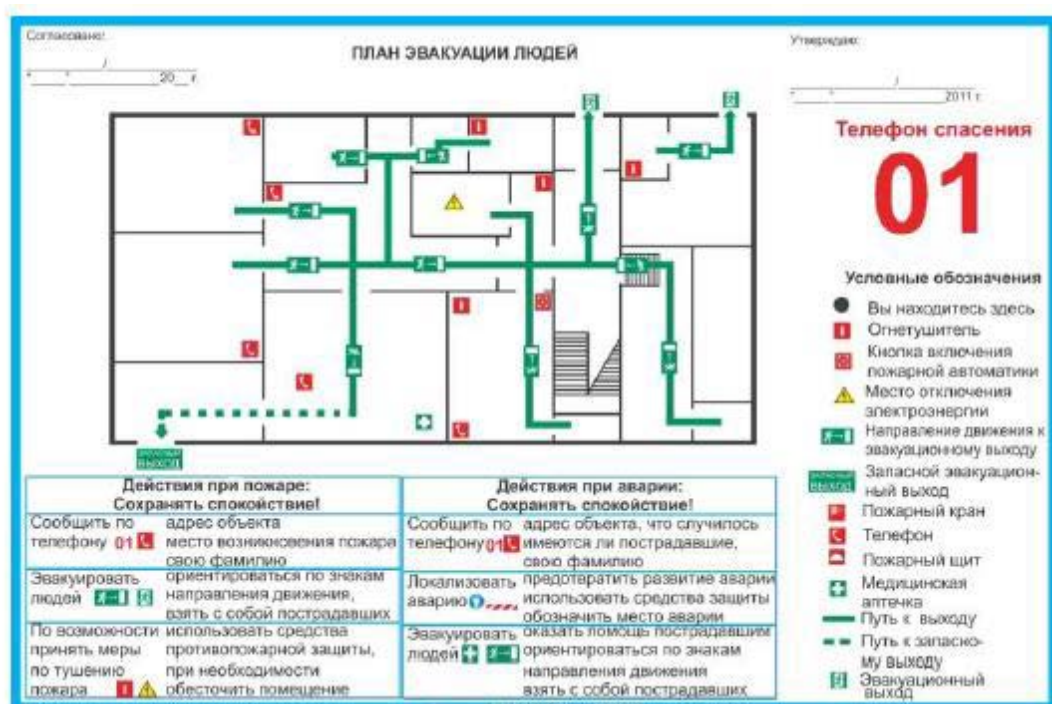


Рисунок 21 – План эвакуации людей

ГЛАВА 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

5.1 Организация и планирование работ

Для совершения данного проекта необходимо разумно планировать работу с занятостью участников и рабочее время каждого человека. В плане, разделены работы, которые выполняются в разном этапе разным люди. В таблица 6 перечислены участники, вовлечённые в работу. А в таблица 7 перечислены этапы проекта и распределение исполнителей.

Таблица 6. Перечень работ и продолжительность их выполнения (пример)

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 80% И – 20%
Подбор и изучение материалов по тематике	НР,	НР – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 70% И – 30%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 30% И – 100%
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	НР – 100% И – 60%
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	НР – 100% И – 80%
Расчет принципиальной схемы устройства	И	И – 100%

Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 20% И – 100%

5.1.1 Продолжительность этапов работ

Для планирования работ, необходимо оценить время для завершения работ каждого этапа. Существует два метода расчёта продолжительности этапа работы.

Первый метод – метод технология и экономика: этот метод применим к полностью разработанной нормативно-правовой базе для трудоёмкости процесса планирования, что, в свою очередь, обусловлено их высокой воспроизводимостью в стабильной среде.

Второй метод – опытно-статистический метод, который может быть реализован двумя способами – аналоговый и экспертный. Аналоговый метод возможен только при наличии устаревшего симулятора в поле зрения исполнителя. В большинстве случаев его можно применять только локально – для отдельных элементов (этап работы). Так что выбирайте экспертный метод для оценки. Экспертные методы пригодны для использования при отсутствии информационных ресурсов, а эксперты в конкретных предметных областях проводят необходимые количественные оценки на основе своего профессионального опыта.

Поскольку исполнители не имеют соответствующих стандартов, мы отказываемся от использования метод технология и экономика, а используем опытно-статистический метод.

Экспертный способ используется при отсутствии вышеуказанных информационных ресурсов и предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию. Для определения

вероятных (ожидаемых) значений продолжительности работ $t_{ож}$ применяется по усмотрению исполнителя одна из двух формул.

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5}, \quad (5.1-a)$$

$$t_{ож} = \frac{t_{\min} + 4 \cdot t_{\text{prob}} + t_{\max}}{6} \quad (5.1-b)$$

где t_{\min} – минимальная продолжительность работы, дн.;

t_{\max} – максимальная продолжительность работы, дн.;

t_{prob} – наиболее вероятная продолжительность работы, дн.

Вторая формула дает более надежные оценки, но предполагает большую «нагрузку» на экспертов.

Для выполнения перечисленных в таблице 6 работ требуются специалисты:

- инженер – в его роли действует исполнитель НИР (ВКР);
- научный руководитель.

Чтобы построить линейную графику, необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести её в календарные дни. Продолжительность в рабочих днях (ТРД) рассчитывается по формуле (5.1-а). А расчёт продолжительности работ в календарных днях (ТКД) ведётся по формуле (5.1-б):

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_{д} \quad (5.2)$$

где $t_{ож}$ – продолжительность работы, дн.;

$K_{вн}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно $K_{вн} = 1,2$;

$K_{д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ($K_{д} = 1,1$; в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{\text{КД}} = T_{\text{РД}} \cdot T_{\text{К}}, \quad (5.3)$$

где $T_{\text{КД}}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{\text{К}}$ – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле¹

$$T_{\text{К}} = \frac{T_{\text{КАЛ}}}{T_{\text{КАЛ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}} \quad (5.4)$$

где $T_{\text{КАЛ}}$ – календарные дни ($T_{\text{КАЛ}} = 365$);

$T_{\text{ВД}}$ – выходные дни ($T_{\text{ВД}} = 52$);

$T_{\text{ПД}}$ – праздничные дни ($T_{\text{ПД}} = 10$).

$$T_{\text{К}} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205$$

В таблице 6 приведен пример определения продолжительности этапов работ и их трудоемкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах (3–5) реализован экспертный способ по формуле (5.1-а), при использовании формулы (5.1-б) необходимо вставить в таблицу дополнительный столбец для t_{prob} . Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоемкости этапа для каждого из двух участников проекта (научный руководитель и инженер) с учетом коэффициента $K_{\text{Д}} = 1,2$. Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение $t_{\text{ож}} \cdot K_{\text{Д}}$. Столбцы 8 и 9 содержат те же трудоемкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на $T_{\text{К}}$ (здесь оно равно 1,212). Итог по столбцу 5 дает общую ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоемкости для каждого из участников проекта. Две последних величины далее будут использованы для определения затрат на оплату труда участников и прочие затраты. Величины трудоемкости этапов по исполнителям $T_{\text{КД}}$ (данные

¹ Здесь он рассчитывается для шестидневной рабочей недели, при пятидневной он больше ($\cong 1,4$).












столбцов 8 и 9 кроме итогов) позволяют построить линейный график осуществления проекта – см. пример в табл. 7.



Таблица 7. Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Постановка задачи	НР	3	4	3,4	3,12	–	3,76	–
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	3	2,4	1,76	0,44	2,12	0,53
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	3	5	3,8	3,48	–	4,19	–
Разработка календарного плана	НР, И	2	3	2,4	1,54	0,66	1,86	0,80
Обсуждение литературы	НР, И	3	5	3,8	1,05	3,48	1,27	4,20
Выбор структурной схемы устройства	НР, И	3	4	3,4	3,12	1,87	3,76	2,25
Выбор принципиальной схемы устройства	НР, И	5	7	5,8	5,32	4,25	6,41	5,12
Расчет принципиальной	И	8	10	8,8	–	8,07	–	9,72

схемы устройства								
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	12	15	13,2	–	12,1	–	14,58
Оформление графического материала	И	5	7	5,8	–	5,32	–	6,41
Подведение итогов	НР, И	5	7	5,8	1,06	5,32	1,28	6,41
Итого:				56,8	20,45	41,51	24,65	50,02

Таблица 8. Линейный график работ (пример)

Этап	НР	И	Март			Апрель		
			10	20	30	40	50	60
1	3,76	–						
2	2,12	0,53						
3	4,19	–						
4	1,86	0,80						
5	1,27	4,20						
6	3,76	2,25						
7	6,41	5,12						
8	–	9,72						
9	–	14,58						
10	–	6,41						
11	1,28	6,41						

НР  И – 

5.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В данной параграфе рассчитывается бюджет данного научно-технического исследования. Для создания проекта необходимо рассчитать затраты, необходимые для реализации комплекса работ. В расчёте учитываются затраты по следующим статьям:

- ☐ Затраты на материалы
- ☐ Затраты на электроэнергию
- ☐ Затраты на амортизацию оборудования
- ☐ Заработные платы
- ☐ Затраты на социальный налог
- ☐ Расходы, учитываемых непосредственно на основе платёжных (расчётных) документов (кроме суточных)
- ☐ Прочие затраты

5.2.1 Расчет затрат на материалы

В данном проекте чтобы получить экспериментальные данные для апробации алгоритма требуются некоторые металлические образцы. При подготовке образцов требуются наждачная бумага и резиновые перчатки для полировки. Кроме этого, чтобы поддерживать работу лабораторного оборудования, мы должны продолжать оказывать жидкий азот для охлаждения.

Таблица 9. Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Наждачная бумага (А4)	150	8	1200
Бумага (А4)	2	240	480
Сплав ВТ6 (20мм*20мм)	200	4	800
Защитные перчатки	25	8	200
Итого:			2680

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны $C_{\text{мат}} = 2680 * 1,05 = 2814$ руб.

5.2.2 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера (в его роли выступает исполнитель проекта), а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Величины месячных окладов (МО) для сотрудников ТПУ можно получить на его портале – *«Главная → Структура ТПУ → Управление первого проректора → Бухгалтерия → Отдел учета расчетов по заработной плате, → Регламентирующие документы»*. Оклад инженера принимается равным окладу соответствующего специалиста низшей квалификации в организации, где исполнитель проходил преддипломную практику. При отсутствии такового берется оклад инженера собственной кафедры (лаборатории).

Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \text{МО} / 24,83 \quad (5.6)$$

учитывающей, что в году 298 рабочих дней и, следовательно, в месяце в среднем 24,83 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе)².

Расчеты затрат на полную заработную плату приведены в таблице 10. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 3. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{\text{ПР}} = 1,1$; $K_{\text{доп.ЗП}} = 1,188$; $K_{\text{р}} = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент $K_{\text{и}} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$. Вышеуказанное значение $K_{\text{доп.ЗП}}$ применяется при шестидневной рабочей

² В 2015 году, в другие годы эти цифры могут несущественно отличаться от указанных.

неделе, при пятидневной оно равно 1,113, соответственно в этом случае $K_{и} = 1,62$.

Таблица 10. Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	33 664	1355,8	21	1,699	48373,6
И	15 470	623,0	42	1,699	44456,0
Итого:					92829,6

5.2.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, т.е. $C_{соц.} = C_{зп} * 0,3$. Итак, в нашем случае $C_{соц.} = 92829,6 * 0,3 = 27848,9$ руб.

5.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Для расчёта затрат на электроэнергию нужно знать местную цену на электроэнергию, мощность устройства и время использования. Затрат на электроэнергию рассчитывается по следующей формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об} \cdot t_{об} \cdot Ц_{э} \quad (5.7)$$

где $P_{об}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{э}$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{об}$ – время работы оборудования, час.

Для ТПУ $Ц_{э} = 5,748$ руб./кВт.час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 4 для инженера ($T_{рд}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{об} = T_{рд} * K_t, \quad (5.8)$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{рд}$, определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение $t_{об}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{ном.} * K_C \quad (5.9)$$

где $P_{ном.}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_C \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности $K_C = 1$.

Пример расчета затраты на электроэнергию для технологических целей приведен в таблица 11.

Таблица 11. *Затраты на электроэнергию технологическую*

№ п/п	Наименование оборудования	Время работы $t_{об}$ (ч)	Потребляемая Мощность $P_{об}$ (кВт)	Цена единицы оборудования, C_b (руб./кВт.час);	Затраты на электроэнергию, руб.
1.	Дифрактометра Shimadzu XRD-7000S	5.3	3	5,748	121,86
2.	Автоматизированный комплекс GRC	6.6	2		75,87
3	Персональный компьютер	110	0,15		16.50
	Итого	121,9	5,15		214,23

5.2.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта.

Используется формула

$$C_{AM} = \frac{H_A * C_{OB} * t_{pф} * n}{F_D}, \quad (5.10)$$

где H_A – годовая норма амортизации единицы оборудования;

C_{OB} – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР.

При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т.п.;

F_D – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году. При этом второй вариант позволяет получить более объективную оценку C_{AM} . Например, для ПК в 2019 г. (301 рабочий дней при шестидневной рабочей неделе) можно принять $F_D = 301 * 8 = 2408$ часа;

$t_{pф}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, задается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

Для определения H_A следует обратиться к приложению 1, содержащему фрагменты из постановления правительства РФ «О классификации основных средств, включенных в амортизационные группы». Оно позволяет получить рамочные значения сроков амортизации (полезного использования) оборудования $\equiv C_A$. Например, для ПК это $2 \div 3$ года.³ Необходимо задать конкретное значение C_A из указанного интервала, например, 2,5 года. Далее определяется H_A как величина обратная C_A , в данном случае это $1 : 2,5 = 0,4$.

³ Если актуальный тип основных средств в приложении отсутствует, следует обратиться к полному тексту постановления, его дополнительные адресные реквизиты «от 1.01.2002 г. № 1 в редакции от 10.12.2010 г.»

Пример. Стоимость ПК 45000 руб., время использования 504 часа, тогда для него $C_{AM}(ПК) = (0,4 \cdot 45000 \cdot 504 \cdot 1) / 2408 = 3767,44$ руб. Стоимость принтера 12000 руб., его $F_d = 500$ час.; $N_A = 0,5$; $t_{pf} = 30$ час., тогда его $C_{AM}(Пр) = (0,5 \cdot 12000 \cdot 30 \cdot 1) / 500 = 360$ руб. Итого начислено амортизации 4 127,44 руб.

№ п/п	Наименование оборудования	Количество (n).	Цена единицы оборудования, руб (Ц _{об})	N _A (год).	Время работы трф (ч)	Амортизация руб
1.	Дифрактометра Shimadzu XRD-7000S	1	8190000	20	5,3	901,3
2.	Автоматизированный комплекс GRC	1	4000000	20	6,6	440.2
3	Персональный компьютер	1	30000	6	110	11,0
	Итого					652,0

5.2.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных)

$$C_{нп} = (2-1) \cdot 100 + 1000 + 800 + 3000 = 4900 \text{ руб.}$$

5.2.7 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$C_{проч.} = (C_{мат} + C_{зп} + C_{соц} + C_{эл.об.} + C_{ам} + C_{нп}) \cdot 0,1$$

Для нашего примера это

$$C_{проч.} = (2814 + 92829,6 + 27848,9 + 214,23 + 652,0 + 4900) \cdot 0,1 = 12925,9 \text{ руб.}$$

5.2.8 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Макет демонстрационной модели принципов КТ».

Таблица 12. *Смета затрат на разработку проекта*

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	2814
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	92829,6
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	27848,9
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	214,23
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	652,0
Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{нр}}$	4900,0
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	12925,9
Итого:		142184,63

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 142184,63$ руб.

Вывод:

Этот эксперимент все еще находится в стадии исследований и не предполагает коммерческое применение, то оценка его экономической эффективности невозможна.

Заключение

В данной работе было изучены структурные и фазовые изменения титановых сплавов ВТ6 в исходном состоянии и обработанный электронным пучком при силе тока 60 мА. *In situ* дифракционные исследования проводились на разработанном дифракционном комплексе. Результаты рентгеноструктурного анализа были подтверждены методом просвечивающей электронной микроскопии и анализом кривых адсорбции водорода.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Выявлено, что линейный нагрев титанового сплава ВТ6 в диапазоне температур 25-500°C приводит к термическому расширению решетки титана на 1,02 % об..

2. Показано, что растворенный водород в основном присутствует в β фазе. Увеличение объемной доли β фазы сопровождается уменьшением α фазы и переходом в $\alpha \rightarrow \alpha_2$

3. Установлено, что наводороживание при температуре 500°C и давлении водорода 0,5 атм. сопровождается следующими фазовыми переходами: $\alpha \rightarrow \alpha + \beta \rightarrow \beta + \alpha_2$.

4. Установлено, что обработка электронным пучком с силой тока 60 мА приводит к увеличению скорости поглощения водорода ~ в 2 раза.

Список использованных источников

- [1] Моисеев В.Н.. Титан в России. Металловедение и термическая обработка металлов, -2005 №8, -18 с.
- [2] Илларионов А.Г. Попов А.А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов. Екатеринбург Издательство Уральского университета, 2014. -136 с
- [3] Eliezer, D. Tal, G. E., Cross C.E., Hydrogen absorption and desorption in a duplex-annealed Ti–6Al–4V alloy during exposure to different hydrogen-containing environments. // Materials science and engineering structural materials properties microstructure and processing.2006. С, 298-304.
- [4] Wei H. Effect of alloying elements on the properties of titanium alloy. // Rare Metal Materials and Engineering, 1978, С. 47-75.
- [5] Winston. R.R. Uhlig's Corrosion Handbook. M.: John Wiley & Sons, 2000. - 885 с.
- [6] Ли Л. Сунь Ц. Мэн С. Статус заявки и перспективы развития титанового сплава. // Развитие титановой промышленности, -2004. № 21 (5). – С.19-24.
- [7] Мэн С. Разработка морского титанового сплава. // Развитие титановой промышленности. – 2000. № 5. – С. 7-8.
- [8] Chaze A.M. Coddet C. Influence of the nature of alloying elements on the adherence of oxide-films. // Formed on titanium-alloys oxidation of metals, - 1987. - С. 61-71.
- [9] Виктория А.К. Высокопрочные конструкционные титановые сплавы и их применение в авиастроении, - Москва, 2001. - 13с
- [10] Qazi J.I., Rahim J., (SAM) Fores F.H. Phase Transformations in Ti-6Al-4V–xH Alloys. // Metallurgical and Materials Transactions A. - 2001 № 32 – С. 2453.
- [11] Kerr W.R., Hydrogen as an alloying element in titanium (hydrovac). // Bidwell: in Titanium 80: Science & Technology. - 1980, № 4. - С. 2477-86.
- [12] Shen C.C., Perng T.P. Pressure–composition isotherms and reversible

hydrogen-induced phase transformations in Ti-6Al-4V. // *Acta Materialia*. - 2007 № 55. – С. 1053–1058.

[13] Ishiyama S., Fukaya K., Eto M., Miya N. Metal-hydride characterization and mechanical properties of Ti-6Al-4V Alloy. // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2000. № 37. – С. 144-152.

[14] Ильин А.А., Колачев Б.А., Носов В.К., Мамонов А.М. Водородная технология титановых сплавов. - М.: Издательский дом МИСиС, 2002. - 392 с..

[15] Eliezer D, Eliaz N, Senkov O.N., Froes F.H. Positive effects of hydrogen in metals. // *Materials Science and Engineering A*. – 2000. № 280. – С.220.

[16] Shintaro I., Kiyoshi F., Motokuni E. and Naoyuki M. Metal-hydride Characterization and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy, // *Journal of Nuclear Science and Technology*, - 2000. № 37. – С. 144-152.

[17] Nelson H.G., *Treatise on Materials Science and Technology*, - М.: Academic Press, NY, 1983, 359 с.

[18] Tal G.E, The hydrogen embrittlement of titanium-based alloys. // Springer Verlag., 2005, № 57, – С. 46-49.

[19] Hardie D. and Ouyang S., Effect of hydrogen and strain rate upon the ductility of mill-annealed Ti6Al4V // *Corrosion Science*., - 1999, № 41, – С. 155–177.

[20] Moody N.R., Greulich F.A. and Robinson S.L., *Metall. Trans.*, - 1984, № 15, – С. 1955–1958.

[21] Shintaro I., Kiyoshi F., Motokuni E. and Naoyuki M. Metal-hydride Characterization and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy, // *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2000. № 37, - С. 144-152.

[22] Zong Y.X.; Wu K.Y.. Thermo hydrogen treatment for microstructure refinement and mechanical properties improvement of Ti-6Al-4V alloy. // *Materials science and engineering structural materials properties microstructure and processing*, - 2017, № 703. – С. 430-437.

[23] Моисеев В.Н., Титан в России. // *Металловедение и термическая*

обработка металлов, 2005г. № 8, С.18.

[24] Илларионов А.Г., Попов А. А., Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов. // Екатеринбург Издательство Уральского университета, 2014, – 136 с

[25] Наерма М. С. Справочник молодого шлифовщика . — М.: Высш. шк, 1985. — 207 с,

[26] Кащук В.А., Верещагин А.Б. Справочник шлифовщика. — М.: Машиностроение, 1988.— 480 с.

[27] Лоскутов В.В., Шлифование металлов. — М.:Москва Машиностроение 1962. — 280 с.

[28] Лурье Г.Б. и Комиссаржевская В.Н. Шлифовальные станки и их наладка. — М.: Высш. школа, 1972. 416 с.

[29] Масловский В.В. Справочник по доводочным работам. — М.: Прапор, 1985. — 121 с.

[30] Попов С.А. Шлифовальные работы. — М.: Высш. шк. 1987.—383 с.

[31] Курзина И.А. , Годымчук А.Ю., Качаев А.А. Рентгенофазовый анализ нанопорошков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 14 с.

[32] Занин И.Е., Чернышев В.В. Методические указания к лабораторному практикуму по курсу "Рентгенография металлов". - Воронеж: Изд-во ВГУ, 2008. - 20 с.

[33] Kudiiarov V.N. et al., Application of automated complex gas reaction controller for hydrogen storage materials investigation, // Advanced Materials Research, 2013. №. 740, С. 690-693,

[34] Ruska E., The early development of electron lenses and electron microscopy. // Microsc Acta Suppl. 1980; №.5. С. 140.

[35] Сафиуллин Р.К., Основы автоматики и автоматизация процессов. — Москва: Издательство Юрайт, 2018. — 146 с.

[36] Гордеев А.С. Основы автоматики. Мичуринск – МичГАУ, 2006. – 220 с.

[37] Crewe, A.V., Isaacson M. and Johnson D. A simple scanning electron microscope. Review of scientific instruments. 1969, №.40. C. 241–246.

[38] Champness P.E. Electron diffraction in the transmission electron microscope. garland science. — M.: Taylor and Francis Ltd 2001 — 184

[39] Rose H.H. Optics of high-performance electron Microscopes. // Science and Technology of Advanced Materials 2008, № 9. C. 12